

На правах рукописи

УДК 621.791

ПОНОМАРЕВА Ирина Николаевна

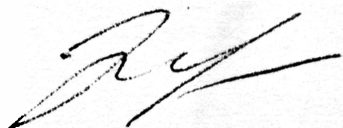
**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013 г.



Научный руководитель:

КУРКИН Алексей Сергеевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

КИСЕЛЕВ Алексей Сергеевич,
доктор технических наук,
в.н.с. НИЦ «Курчатовский институт»

ПАВЛОВ Николай Васильевич,
кандидат технических наук, с.н.с.,
ОАО «ВНИИЖТ», в.н.с.

Ведущая организация: Научно-исследовательский и проектный институт по строительству и эксплуатации объектов топливно-энергетического комплекса (НИПИСтройТЭК), г. Москва

Защита диссертации состоится «30» мая 2013 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

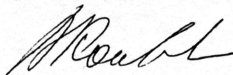
Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим присылать по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент



А.В. Коновалов



2782

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Магистральные трубопроводы, поставляя нефть и газ с северных месторождений в центральные районы страны и на экспорт, пересекают обширные территории. В случае аварии вблизи населенных пунктов возникает серьезная опасность для жизни людей и экологии. При авариях в труднодоступной местности опасность связана с увеличением продолжительности ремонта и перерывом в энергоснабжении важных объектов. Аварийность может быть снижена за счет регулярной технической диагностики и принятия решений о режиме эксплуатации на основе прогноза остаточного ресурса каждого участка трубопровода.

В связи с этим растет актуальность исследований, направленных на повышение достоверности и точности прогнозирования ресурса. Наиболее сложными для расчета являются сварные соединения трубопроводов, в особенности монтажные стыки и ремонтные соединения, сваренные в полевых условиях. Одним из важных факторов, существенно влияющих на работу сварных соединений, являются остаточные сварочные напряжения (ОСН), которые в настоящее время не учитываются при расчетах магистральных трубопроводов на прочность. Главной причиной этого является отсутствие надежных методов расчета ОСН. Тема данной работы направлена на создание методик проведения таких расчетов и использования полученных результатов при оценке прочности и ресурса сварных соединений магистральных трубопроводов.

Цель работы – повышение точности оценки технического состояния и прогнозирования ресурса сварных соединений трубопроводов на основе учета распределения остаточных сварочных напряжений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику компьютерного моделирования процесса многопроходной сварки кольцевых стыковых соединений трубопроводов.
2. На основе компьютерного моделирования установить закономерности образования ОСН в многопроходных стыковых соединениях.
3. Разработать методику представления результатов расчета ОСН в виде, пригодном для использования при оценке прочности и ресурса.
4. Расширить возможности программного комплекса «Ресурс» по оценке прочности и ресурса кольцевых сварных соединений трубопроводов.

Научная новизна.

1. Установлены характерные особенности распределения ОСН в сварных трубопроводах из низколегированных сталей, влияющие на их работоспособность. При увеличении толщины стенки и количества проходов сварки максимум продольных напряжений смещается вглубь сечения стенки, а его уровень снижается из-за неполного прогрева заваренного сечения. Выявленные закономерности распространяются как на V – образную, так и на щелевую разделку кромок.

2. Разработан новый метод адекватного учета ОСН в инженерных расчетах прочности и ресурса сварных конструкций. В отличие от усадочных сил и перемещений, метод эквивалентных начальных температур обеспечивает воспроизведение как сварочных деформаций, так и компонент напряженного состояния в сложном сварном соединении.

Практическая ценность.

1. Установление зависимости уровня ОСН от толщины свариваемой стенки трубы позволило обосновать исключение операции послесварочной термообработки при сварке труб большой толщины и существенно сократить затраты и сроки строительства трубопроводов «Бованенково-Ухта» и «Южный поток».

2. Разработанная методика учета ОСН использована при разработке ПК «Ресурс газопроводов» для оценки прочности и ресурса сварных соединений с дефектами, а также при разработке нормативных документов, утвержденных в ОАО «Газпром».

Методы исследования – математическое моделирование совокупности физических процессов, протекающих при монтаже и последующей эксплуатации участка сварного трубопровода с помощью программного комплекса «СВАРКА».

Достоверность и точность результатов моделирования подтверждены в ходе верификации комплекса путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными замерами остаточных деформаций и напряжений.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана в 2007 и 2010 годах, на Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (2010, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана) и на XII международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех-2011» (16-18 марта 2011 г. Ухта).

Публикации. Материалы диссертации отражены в 3 печатных работах в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также в тезисах докладов на конференциях.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 150 страницах машинописного текста, иллюстрируется 83 рисунками, содержит 4 таблицы, состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы (111 наименований).

Содержание работы

В первой главе проведен анализ современного состояния магистральных трубопроводов, выделены причины, влияющие на надежность их эксплуатации, определены возможные пути продления срока их службы, приведен анализ методов оценки надежности и ресурса сварных магистральных трубопроводов. Выявлено существенное влияние ОСН на прочность и ресурс сварных соединений трубопроводов.

Основа экспериментальных и теоретических исследований механизма образования ОСН при сварке и их влияния на прочность сварных конструкций была заложена в середине прошлого века в трудах российских ученых Г.А.Николаева, Н.О.Окерблома, Е.О.Патона, В.П.Вологодина. Нашей стране принадлежит приоритет и в разработке методов компьютерного моделирования сварочных процессов (В.А.Винокуров, В.И.Махненко). В дальнейшем это направление, как наиболее перспективное, получило развитие в трудах отечественных (В.А.Кархин, А.С.Куркин, А.С.Киселев) и зарубежных (J. Goldak, D. Radaj, L. E. Lindgren) исследователей. Разработанные специализированные программные комплексы («Сварка», «SYSWELD») позволяют рассчитывать ОСН в сложных сварных конструкциях.

В то же время достижения в расчете ОСН оказались недостаточно востребованы при оценке прочности и ресурса сварных конструкций. В большинстве нормативных документов по проектированию конструкций они не учитываются или учитываются весьма грубо. Это связано, главным образом, с сохраняющейся сложностью и трудоемкостью их определения для произвольной конструкции, а также с неоднозначным характером их влияния на прочность и ресурс. В связи с этим опыт интегрированной оценки ОСН, включающей в себя как их определение, так и практическое применение полученных результатов, в мире пока ограничен.

Проведенный обзор литературы позволил сформулировать цель и определить основные задачи исследований.

Во второй главе представлена разработанная методика компьютерного моделирования сварочных напряжений при многопроходной сварке.

Программный комплекс «Сварка» разрабатывается на кафедре технологий сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э.Баумана в течение нескольких десятков лет и обеспечивает к настоящему времени адекватное моделирование всех основных физических процессов, влияющих на образование сварочных деформаций и напряжений при дуговой сварке.

Основным условием получения достоверных результатов является полнота комплекта используемых в расчете исходных данных. Эти данные включают геометрическую информацию о моделируемом сварном соединении, свойства основного и присадочного материалов, а также параметры режима и сварки и условия окружающей среды.

Схема сварного соединения с кольцевым многопроходным швом и компоненты напряженного состояния в нем представлены на рис. 1.

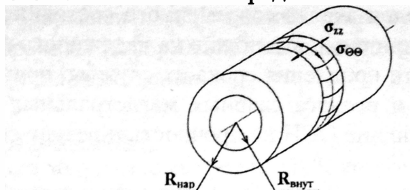


Рис. 1. Схема сварного соединения и компоненты напряженного состояния

При моделировании процесса сварки трубопроводов были использованы реальные технологии, применявшиеся при строительстве трубопроводов ранее и в настоящее время. Расчет остаточных напряжений при сварке по применявшимся ранее технологиям актуален при продлении срока службы труб после длительной эксплуатации. Рассмотрены как варианты разделки кромок под сварку 30-летней давности (рис. 2, а и б), так и современные варианты с V - образной (рис. 2 в и г) и щелевой (рис. 2, д) разделкой.

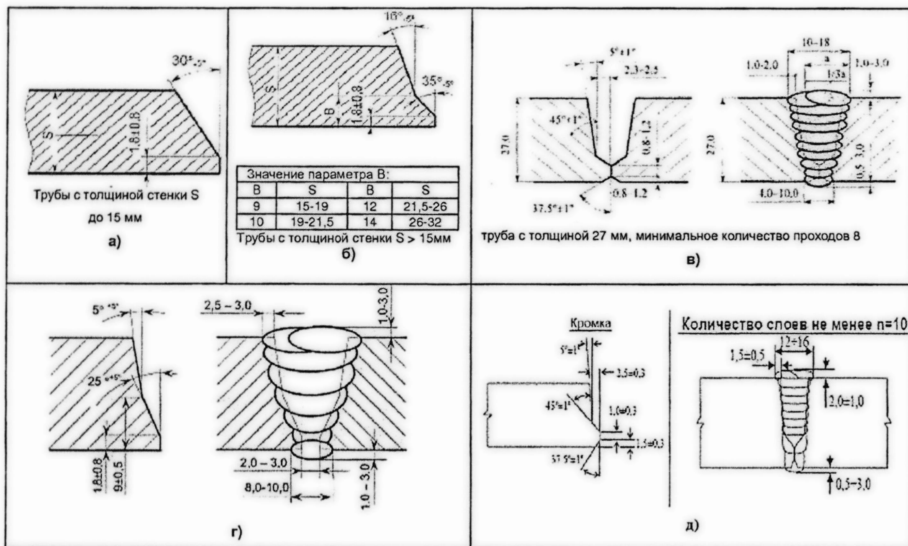


Рис. 2. Типы разделок кромок под сварку

В расчете была использована осесимметричная модель сварного соединения с мгновенной укладкой каждого валика сварного шва. Правомерность применения такой схемы, существенно снижающей вычислительные затраты при

расчете ОСН в кольцевых стыках трубопроводов, подтверждена результатами численных экспериментов.

Примеры построенных конечноэлементных моделей со схемами граничных условий (закреплений и внутреннего давления) при эксплуатации трубопровода показаны на рис. 3.

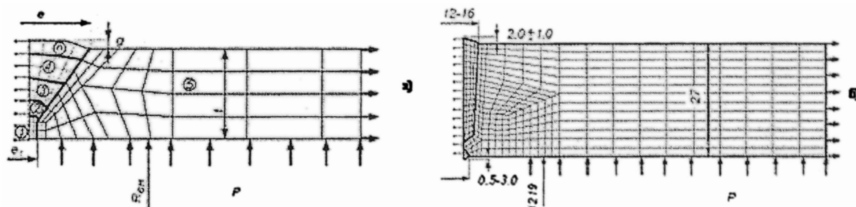


Рис. 3. Фрагменты моделей сварных соединений: а – для V-образной разделки кромок (1...4, n – номера проходов; 5 – корпус трубы; P – внутреннее давление; $R_{вн}$ – внутренний радиус трубы; e, g – ширина и высота усиления); б – для щелевой разделки кромок

Для выявления влияния параметров сварного соединения на распределение ОСН был составлен план вычислительного эксперимента (табл. 1), охватывающий диаметры труб от 720 до 1420 мм и толщины стенок от 7 до 33 мм. Сварные соединения выполнялись в одностороннюю V-образную и щелевую разделку, при этом число валиков изменялось от 3 до 16.

Таблица 1.

План вычислительного эксперимента

№	Диаметр, мм	Толщина, мм	Число проходов	Ток, А	Напряжение, В	КПД	Погонная энергия, Дж/мм	Скорость сварки, мм/с
1	1420	33,4	16	175	26	0,8	3640	1,9
2	1420	30	15	190	26	0,8	3952	2,1
3	1420	27,6	13	187	26	0,8	3890	1,96
4	1420	23	11	180	28	0,8	4032	2,5
5	1420	18,7	5	187	27	0,8	4040	2,03
6	1020	12,9	5	187	28	0,8	4189	2,53
7	720	16	5	187	24	0,8	3590	3,53
8	720	11	4	187	26	0,8	3890	3,61
9	720	7,3	3	187	26	0,8	3890	4,8
10	1420	27	10	205	27	0,8	4428	3,9

Достоверность и точность результатов моделирования были подтверждены в ходе верификации комплекса путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными замерами остаточных деформаций и напряжений. Измерения взаимного поперечного перемещения точек свариваемых пластин на лицевой и обратной поверхности производились после укладки каждого валика многопроходного шва. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рис. 4. Максимальное отклонение не превышает 12 %.

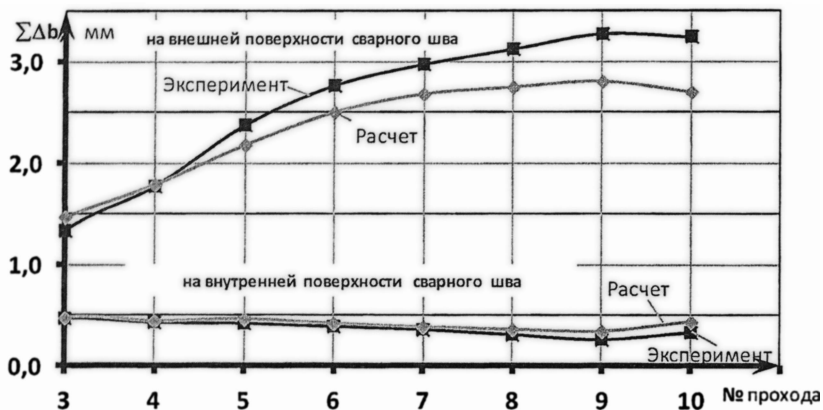


Рис. 4. Поперечные перемещения на поверхностях сварного шва после сварки каждого валика

В третьей главе представлены результаты расчетов ОСН в различных сварных соединениях магистральных трубопроводов (в продольных и кольцевых стыковых швах, а также в угловом шве таврового соединения), а также проведено обобщение полученных результатов компьютерного моделирования. Проведенные расчеты позволили выявить особенности деформаций труб при сварке кольцевых стыков. Нагрев кромок приводит к увеличению диаметра и повороту кромок, который фиксируется при кристаллизации шва, а после остывания зона сварного соединения имеет значительные деформации изгиба. У внутренней поверхности трубы возникает растяжение, а у внешней – сжатие. Характерные распределения продольных напряжений после сварки первого шва показаны на рис. 5.

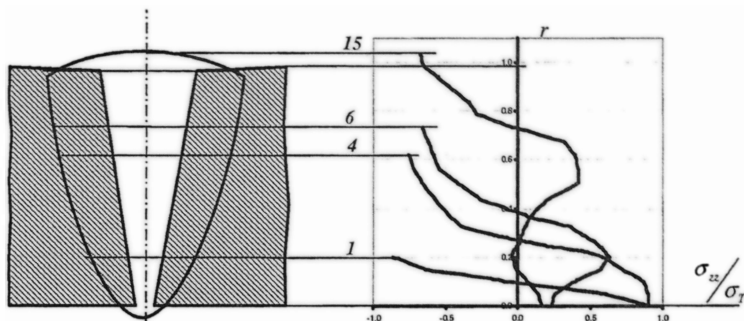


Рис 5. Эпюры продольных напряжений после укладки первого, четвертого, шестого и пятнадцатого валиков шва

Представлены эпюры напряжений после укладки различного числа валиков шва. Номер кривой соответствует номеру последнего уложенного валика. Характер распределения напряжений после укладки первого валика такой же, как при однопроходной сварке (кривая 1). При укладке последующих валиков происходит прогрев всего шва до высокой температуры, при которой предел текучести металла и сварочные напряжения от укладки предыдущих валиков снижаются. При небольшой толщине стенки (до 20 мм) все уложенные валики остаются совместно, поэтому распределение σ_{zz} сохраняет тот вид, который был получен после сварки первого валика (кривая 4). Уровень растягивающих напряжений у внутренней поверхности трубы около 75% от предела текучести σ_T , уровень сжимающих у наружной поверхности 70% от предела текучести.

При большей толщине стенки трубы последние валики не обеспечивают прогрева корня шва до той температуры, при которой предел текучести металла близок к нулю. В результате напряжения от укладки предыдущих валиков частично сохраняются и взаимодействуют с напряжениями от последующих валиков, при этом распределение σ_{zz} изменяется (кривые 6 и 15). Наибольшие изменения проявляются в корне шва. Максимальный уровень напряжений σ_{zz} . Максимум напряжений при этом перемещается в глубь сечения и снижается до 50% от σ_T .

Сводные диаграммы результатов всех численных экспериментов, представленные в безразмерных параметрах (рис. 6), позволили дать математическое описание распределений компонент напряжений по толщине трубы и вдоль ее образующей, пригодное для расчетной оценки ОСН в рамках методики определения прочности и остаточного ресурса. Для этого были использованы огибающие всех полученных эпюр.

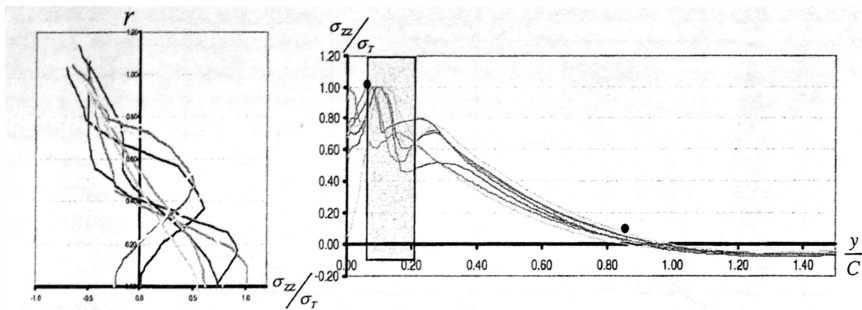


Рис. 6. Распределения продольных ОСН по толщине и вдоль образующей трубы
 $(r = \frac{R - R_{\text{внутр}}}{t}, C = \sqrt{2R_{\text{нар}}s}, R - \text{радиальная координата, } y - \text{расстояние от оси шва})$

Выявленные закономерности распространяются и на сварку в щелевую разделку (вариант 10 в табл. 1).

Взаимодействие рабочих напряжений от внутреннего давления и других эксплуатационных факторов с остаточными напряжениями достаточно сложно, результирующее поле напряжений не может быть получено путем простой суперпозиции. Проведенные расчеты показали, что в отдельных зонах достигается предел текучести и происходит перераспределение напряжений, а положение максимума суммарных напряжений может смещаться от положения максимума напряжений от рабочей нагрузки.

Четвертая глава посвящена применению результатов расчета ОСН для оценки прочности и ресурса сварных газопроводов.

Непосредственное применение методика моделирования ОСН при многопроходной сварке кольцевых стыков труб нашла в процессе обоснования отказа от послесварочной термообработки при монтаже труб с толщиной стенки выше 30 мм. В нормативных документах рекомендуется проводить термообработку для снятия ОСН, которая в условиях холодного климата резко усложняет и удорожает технологию монтажа.

Для обоснования исключения этой операции было проведено сопоставление результатов компьютерного моделирования процессов сварки кольцевых стыков труб с наружным диаметром 1420 мм и различной толщиной стенки. Проведенные расчеты для стали Х80 показали, что распределение продольных напряжений по сечению стыка при переходе от 18,7 к 27,7 и затем к 33,4 мм качественно не изменяется (рис. 7), при этом максимальные значения напряжений убывают по мере увеличения толщины и числа проходов сварки. Особенно существенным является снижение напряжений в критической зоне у внутренней поверхности трубы, вблизи корня сварного шва.

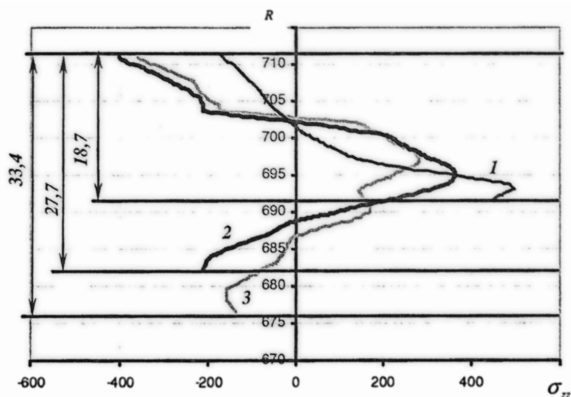


Рис. 7. Распределения ОСН σ_{zz} по толщине трубы в поперечном сечении по оси шва: 1 - 18,7 мм; 2 - 27,7 мм; 3 – 33,4 мм

На основании результатов проведенных расчетов был сделан вывод о допустимости использования для труб с толщиной стенки 33,4 мм такой же технологии сварки и термообработки, как для трубопроводов с меньшей толщиной стенки 27,7 мм и 18,7 мм, для которых имеется положительный опыт эксплуатации после монтажа без послесварочной термообработки. Данная методика может быть использована для обоснования отказа от термообработки при монтаже других высоконагруженных трубопроводов.

Применение результатов моделирования ОСН при расчетах прочности и ресурса сварных конструкций сдерживается, в основном, двумя факторами. Это, во-первых, большая трудоемкость и сложность расчетов ОСН, необходимость в специализированном программном обеспечении, мощной компьютерной технике и высокой квалификации персонала. Во-вторых – проблемы включения полученных распределений ОСН в процедуру расчета прочности и ресурса. Для упрощения решения этой задачи служит метод расчленения: представления результатов расчета ОСН в виде эквивалентных фиктивных «усадочных» сил и перемещений, добавляемых затем к эксплуатационным нагрузкам при расчетах на прочность изменяющих действие ОСН.

К сожалению, для адекватной передачи поля трехосных ОСН невозможно подобрать простую систему сил или перемещений. В этой связи в данной работе предложена новая методика, использующая для этой цели поле эквивалентных начальных температур (ЭНТ). Это название дано такому полю температур, от которого при остывании в сварной конструкции возникает заданное распределение ОСН.

Достоинством метода ЭНТ является то, что в отличие от напряжений, температура является скалярной величиной, поле температур не требует уравнивания, возможность его дальнейшего использования легко реализуется даже в стандартном программном обеспечении по оценке прочности МКЭ (например, в ANSYS).

Физический смысл этого метода в том, что причиной ОСН является неравномерная пластическая деформация металла шва и околошовной зоны на стадии нагрева. В результате этого полная разгрузка металла сварного соединения при остывании (проход через ноль) наступает раньше, чем полное остывание. Температура, при которой каждая точка сварного соединения испытывает полную разгрузку, равна ЭНТ. При дальнейшем остывании от этой температуры и формируется распределение ОСН.

Из уравнений термоупругости следует, что при жесткой заделке гидростатическое напряжение в каждой точке упругого тела пропорционально температуре ее нагрева. Это соотношение сохраняется и при нежестком закреплении (например, в центре массивного шара), но коэффициент пропорциональности уменьшается в несколько раз. В основе метода ЭНТ лежит предположение, что такое соотношение между ЭНТ и гидростатической составляющей ОСН действует и для произвольного сварного соединения:

$$T_{\text{Э}} = \frac{1 - 2\mu}{k\alpha E} \sigma_m \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга. Для уточнения коэффициента пропорциональности k была выполнена серия расчетов применительно к кольцевым стыкам трубопроводов. Для реализации предлагаемой методики необходимо:

- 1) иметь эталонное распределение компонент остаточных напряжений, полученное путем моделирования всего комплекса тепловых, металлургических, структурных и деформационных процессов, протекающих при сварке конструкции по заданной технологии;
- 2) подобрать такое поле начальных температур, которое обеспечивает за один шаг охлаждения получение распределения компонент напряжений, максимально близкого к эталонному;
- 3) представить полученное распределение температур в табличной форме или в виде аппроксимирующих формул для использования в качестве исходных данных при оценке ресурса сварной конструкции.

Как правило, поле температур в сварной конструкции в процессе ее эксплуатации однородное. Поэтому если перед первым шагом моделирования добавить еще один, в начале него ввести из исходных данных начальное температурное поле, а в конце задать во всех точках модели одинаковую температуру, то в модели возникнет уравновешенное поле начальных напряжений, соответ-

ствующее задаваемым ОСН. Целесообразно на этом дополнительном шаге задавать систему закрепления сварной конструкции, которую она имела во время сварки. Затем снимать эти закрепления, и на всех последующих шагах задавать закрепления, соответствующие условиям эксплуатации конструкции.

Сопоставление исходного распределения поля ОСН с полем, рассчитанным через ЭНТ, показало, что как σ_m , так и отдельные компоненты ОСН имеют достаточно близкое распределение (рис. 8).

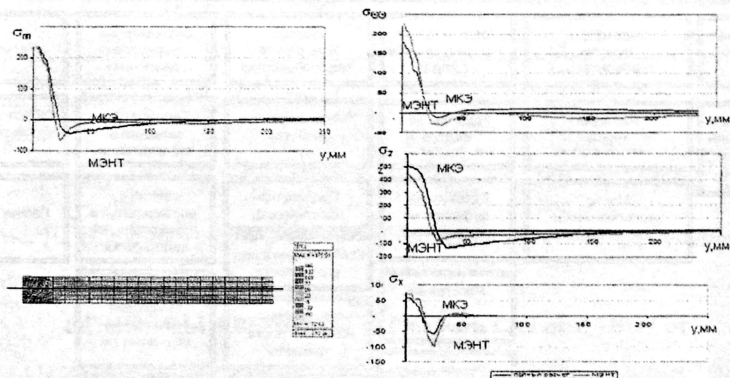


Рис. 8. Представление результатов расчета ОСН в виде поля ЭНТ для трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 33,4 мм

В связи с большим объемом необходимых расчетов при техническом диагностировании магистральных трубопроводов и нехваткой квалифицированных расчетчиков единственным разумным решением является реализация нормативных документов в виде автоматизированного программного обеспечения. В такой программный комплекс «Ресурс газопроводов», разработанный по заказу ОАО «Газпром» вошли результаты определения ОСН, полученные в данной работе (рис. 9).

Компоненты ОСН в зоне обнаруженного дефекта рассчитываются по аппроксимационным формулам в зависимости его расположения по толщине стенки трубы и расстояния от оси шва. Они могут быть как растягивающими, так и сжимающими и вызывать снижение или увеличение срока прогнозируемого ресурса безотказной работы.

Влияние уровня ОСН на результаты оценки ресурса кольцевого стыка с дефектом представлены на рис. 10. Расчет выполнен применительно к трубе диаметром 1220 мм с толщиной стенки 22,6 мм. Подповерхностный плоскостной дефект площадью 70 мм² расположен у внутренней поверхности трубы на

глубине 1 мм. Его расстояние от оси шва составляет 10 мм (дефект расположен в зоне термического влияния шва).



Рис. 9. Схема исходных данных и расчетных модулей ПК «Ресурс газопроводов»

Прогнозируемый ресурс до образования течи без учета ОСН составил 25 лет. Учет ОСН, уровень которых в зоне расположения дефекта составляет около 100 МПа, приводит к сокращению ресурса до 15 лет. При растягивающих ОСН на уровне 200 МПа сумма рабочих и остаточных напряжений достигает предела текучести стали, а прогноз ресурса снижается до 10 лет. Этот прогноз сохраняется и при более высоких растягивающих ОСН, поскольку при первом цикле рабочей нагрузки происходит их снижение до уровня 200 МПа вследствие пластической деформации. При действии сжимающих ОСН можно прогнозировать увеличение ресурса (до 34 лет при ОСН на уровне -100 МПа).

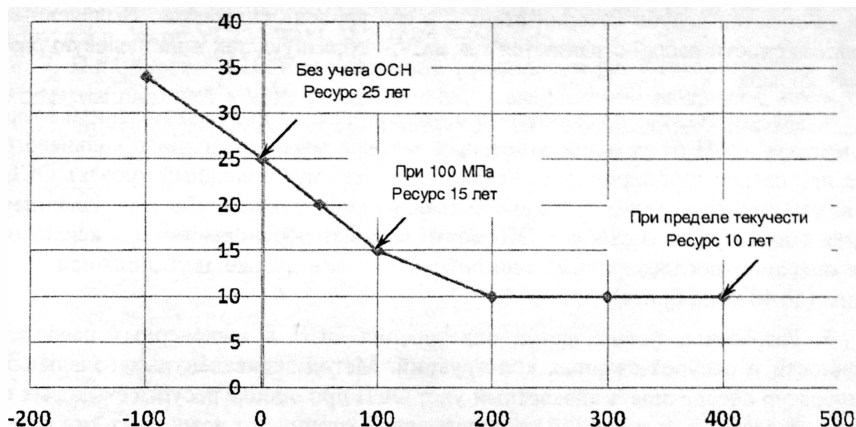


Рис. 10. Влияния уровня ОСН на ресурс сварного стыка трубопровода

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Остаточные сварочные напряжения являются важным фактором, влияющим на прочность и ресурс сварных конструкций и требующим учета при их проектных и контрольных расчетах. Инженерный расчет прочности и ресурса конструкций с учетом ОСН может быть реализован только в рамках компьютерной программы.

2. Разработанная методика и программный комплекс «Сварка» обеспечивают адекватное моделирование всех основных физических процессов, влияющих на образование сварочных деформаций и напряжений при дуговой сварке. Достоверность и точность результатов моделирования подтверждены в ходе верификации комплекса путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными замерами остаточных деформаций и напряжений.

3. На основе решения нелинейной термдеформационной задачи получены поля остаточных напряжений в кольцевых монтажных стыках трубопроводов из низколегированных сталей применительно к принятым в нефтегазовой отрасли технологиям сварки. Установлено, что распределение продольных остаточных напряжений в сварном трубопроводе из низколегированных сталей имеет ряд характерных особенностей, зависящих от толщины стенки трубопровода: при числе проходов до 4-5 распределение остаточных напряжений такое же, как при односторонней сварке, что связано с полным прогревом всего сечения последним валиком шва. При большем количестве проходов не происходит полного прогрева заваренного сечения, в результате максимум напряже-

ний смещается вглубь сечения стенки, а его уровень снижается. Выявленные закономерности распространяются как на V – образную, так и на щелевую разделку кромок.

4. По результатам компьютерного моделирования выявлен механизм взаимодействия ОСН от укладки отдельных валиков многопроходного кольцевого шва при сварке трубопроводов. Установлено, что максимальный уровень ОСН не возрастает по мере роста толщины свариваемой стенки трубы (для заданных марки стали и режима сварки). Это может служить обоснованием для исключения операции послесварочной термообработки при сварке труб большой толщины (до 40 мм и более).

5. Разработан новый метод определения ОСН в инженерных расчетах прочности и ресурса сварных конструкций. Метод эквивалентных начальных температур обеспечивает адекватный учет ОСН при оценке ресурса стыковых и тавровых сварных соединений газопроводов. В отличие от усадочных сил и перемещений, он обеспечивает воспроизведение как сварочных деформаций, так и компонент напряженного состояния в сварном соединении.

6. Результаты проведенных исследований ОСН использованы при разработке ПК «Ресурс газопроводов» для оценки прочности и ресурса сварных соединений с дефектами, а также при разработке нормативных документов, утвержденных в ОАО «Газпром».

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Пономарева И.Н. Остаточные сварочные напряжения при многопроходной сварке стыков трубопроводов // Сварочное производство. 2009. №1. С.7-11.
2. Пономарева И.Н. Расчетное обоснование исключения послесварочной термической обработки стыков магистральных трубопроводов из высокопрочной стали класса X80 большой толщины // Сварка и диагностика. 2009. №4. С. 23-27.
3. Куркин А.С., Пономарева И.Н. Метод эквивалентных начальных температур для учета сварочных напряжений при расчете на прочность // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77, № 2. С.51-55.
4. Kurkin A.S., Ponomareva I. N. Method of Equivalent Initial Temperatures to Account for Welding Stresses in Strength Analysis // Inorganic Materials. 2012. Vol. 48, № 14. P. 1309–1313.
5. Оценка влияния особенностей процесса сварки на сварочные напряжения в неповоротных стыках магистральных трубопроводов / И.Н. Пономарева [и др.] // Сварка и диагностика. 2012. № 5. С. 37-41.
6. Пономарева И.Н. Расчет остаточных напряжений при многопроходной сварке стыков трубопроводов // XII международная молодежная научная кон-

ференция «Севергеозкотех-2011»: материалы конференции (16-18 марта 2011 г. Ухта): в 5 ч. Ухта: УГТУ, 2011. Ч.2. С.257-260.

7. Пономарева И.Н. Представление результатов расчета остаточных сварочных напряжений в виде распределения эквивалентной начальной температуры // Будущее машиностроения России: Сб.тр. Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (22-25 сентября 2010 г.). М., 2010. С.105-106.