Федосеева, Елена Михайловна. Повышение качества сварных соединений сталей трубного назначения для обеспечения эксплуатационной безопасности магистральных трубопроводов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.10 / Федосеева Елена Михайловна; [Место защиты: Перм. гос. техн. ун-т].- Пермь, 2011.- 140 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2924

На правах рукописи

04201103098

C:\Users\Pavel\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.551\media\image1.jpeg

Федосеева Елена Михайловна

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ ТРУБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Игнатов М. Н.

Пермь-2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И ИХ РОЛЬ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
   1. Неметаллические включения, определения, классификация 8
   2. Классификация, номенклатура и взаимозаменяемость трубных сталей производства разных предприятий РФ и других стран 12
   3. Сравнение требований технических условий на загрязненность неметаллическими включениями металла слитков, поковок, листового проката, труб и сварных соединений для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов по техническим условиям, соответствующих ГОСТов 18
   4. [Методы контроля стали по неметаллическим включениям 20](#bookmark0)
   5. [Общая статистика и доля разрушений от неметаллических включений магистральных нефте- и газопроводов 22](#bookmark1)
   6. Влияние неметаллических включений на свойства стали

и стальных сварных соединений 26

* 1. Мероприятия по снижению загрязненности неметаллическими включениями металла углеродистых сталей и сварных соединений 30
  2. [Технологии производства магистральных трубопроводов 32](#bookmark4)
  3. [Анализ прочности трубопроводов в ANSYS 38](#bookmark5)
  4. [Выводы по главе 1 39](#bookmark6)

1. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
   1. Основной металл, сварочные материалы и оборудование 40
   2. [Методика металлографического исследования сварных соединений 47](#bookmark7)
      1. [Макроструктурный анализ 47](#bookmark8)
      2. Микроструктурный анализ 48
      3. Анализ неметаллических включений 49
   3. Рентгеноспектральный (микрозондовый) анализ 51
   4. [Измерение микротвердости 52](#bookmark9)
   5. Методика усталостных испытаний 53
   6. Рентгеноспектральный анализ 54
   7. Термический анализ 57
   8. Рентгенофазовый анализ 57
   9. [Метод наноиндентирования 58](#bookmark11)
   10. [Выводы по главе 2 '. 59](#bookmark12)
2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
   1. Металлографический анализ неметаллических включений в сварных соединениях магистральных трубопроводов, выполненных по разным технологиям (РД, АФ, МПС и STT) 60
   2. [Физико-механические свойства неметаллических включений 76](#bookmark15)
   3. Химический и минералогический состав неметаллических

включений 80

з

* 1. [Химическая неоднородность включений 85](#bookmark16)
  2. Влияния термодиффузионных процессов на природу, морфологию и распределение неметаллических включений в многослойных сварных соединениях при сварке плавлением 91
  3. Выводы по главе 3 101

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА И ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ
   1. Моделирование нестационарных процессов в трубопроводе

и расчет напряженно-деформированного состояния металла сварного

трубного соединения в зоне неметаллического включения

методом конечных элементов 102

* 1. [Влияние неметаллических включений и технологий сварки на усталостные свойства сварных соединений магистральных трубопроводов 110](#bookmark17)
  2. Выводы по главе 4 122

1. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
   1. Рекомендации, позволяющие в рамках нормативно-технической документации снизить содержание неметаллических включений 122
   2. Выводы по главе 5 124

[ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 125](#bookmark21)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 127

*!*

*ґ*

*\*

ПРИЛОЖЕНИЕ 140

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** В соответствии со стратегией развития энерге­тического сектора экономики РФ основным направлением научно- технической политики освоения новых нефтяных и газовых месторождений является строительство магистральных трубопроводов (МТ). Одной из наибо­лее важных задач трубопроводного транспорта углеводородов является обес­печение его надежной и безопасной работы путем сокращения риска возник­новения аварийных ситуаций. Решение этой задачи позволит снизить безвоз­вратные потери транспортируемых продуктов, предотвратить разрушение ин­женерных сооружений и обеспечить, таким образом, оптимальное функциони­рование трубопроводных систем.

Актуальность данной проблемы связана с высокой частотой отказов МТ, приводящих в ряде случаев к катастрофическим последствиям. Средняя ин-~ тенсивность аварий за последние 5 лет составила 0.27 (на 1000 км в год). Более 30% отказов происходит на трубопроводах, построенных в 90-е г.г. прошлого столетия. Анализ происшедших за последнее время аварий показал, что ос­новными причинами по которым произошли разрушения участков МТ, были недоработки проектной и исполнительной документации, человеческий фак­тор, сварные швы, различные строительные или ремонтные концентраторы напряжений (вмятины, накладки, риски, задиры и др., составляющие до 7% отказов), а также дефекты сварных соединений типа неметаллических включе­ний (НВ) по причине которых произошло до 1.5% отказов.

Известно, что МТ работают в условиях циклического нагружения от из­менения внутреннего давления перекачиваемого продукта. Поэтому оставлен­ные «без внимания» неметаллические включения сварных соединений, обла­дающие повышенной твердостью и хрупкостью и, следовательно, являющиеся концентраторами напряжений, могут стать источниками зарождения усталост­ных трещин и привести к аварийным разрушениям трубопроводов.

Материаловедческими проблемами сталей трубного назначения зани­маются такие ведущие организации, как ОАО ВНИИСТ, осуществляющая раз­работку нормативно-технической документации, проектирование и строитель­ство МТ совместно с ОАО «Газпром» и ОАО «АК«Транснефть», заводы по из­готовлению труб магистрального назначения (Челябинский ТПЗ, Харцызкий ТЗ) и др. Ранее анализом неметаллических включений в сварных соединениях занимались В.В. Подгаецкий, И.Р. Пацкевич и др., на сегодняшний день дан­ной проблеме уделяют внимание М.А. Худяков, М.Х. Муфтахов, В.И. Глад- штейн и др., считающие неметаллические включения в сварных соединениях первопричиной образования трещин, приводящих в некоторых случаях к раз­рушению трубопроводов.

Таким образом, повышение качества сварных соединений сталей труб­ного назначения для обеспечения эксплуатационной безопасности МТ являет­ся задачей актуальной и своевременной.

Цель работы. Повышение качества сварных соединений низколегиро­ванных сталей трубного назначения класса прочности до К70 путем оптимиза­ции технологий сварки кольцевых стыковых соединений труб диаметром 1220 и 1420 мм для обеспечения эксплуатационной безопасности магистральных трубопроводов.

**Задачи исследования:**

1. Обобщить и систематизировать сведения о роли неметаллических включений (НВ) в сварных соединениях МТ.
2. Обосновать и использовать современные методы выявления дефектов типа НВ в сварных соединениях трубных сталей, идентифицировать их и вы­яснить закономерности их образования, морфологии и распределения в метал­ле шва.
3. Провести экспериментально-теоретическое обоснование влияния гра­ницы перехода металл-шов и неметаллических включений на изменение на­пряжений в металле шва и усталостные свойства сварных соединений сталей трубного назначения.
4. Выявить влияние и оптимизировать технологические параметры свар­ки кольцевых стыковых соединений труб диаметром 1220 и 1420 мм сталей класса прочности до К70 с целью повышения качества и обеспечения эксплуа­тационной безопасности МТ.

**Научная новизна:**

1. Впервые установлено влияние термодифузионных процессов на коа- лесценцию неметаллических включений, изменение их химического и минера­логического состава, морфологию и распределение в разных зонах сварных соединений при многопроходной сварке плавлением.
2. Выявлено влияние границы перехода металл — шов и неметаллических включений на изменение напряжений в сварных швах кольцевых соединений трубопроводов решением численной задачи методом конечных элементов, проведена корректировка рабочего давления трубопровода для обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов.
3. Установлено, что при сварке магистральных трубопроводов из сталей класса прочности до К70 параметром оптимизации технологий сварки являет­ся величина погонной энергии, определенная расчетно-экспериментальными методами и определяющая как усталостные свойства, так и разновидность, ве­личину и распределение неметаллических включений в металле шва сварных соединений.

**Практическая ценность:**

Разработаны рекомендации в рамках нормативно-технической докумен­тации по выбору сварочных материалов и параметров режимов сварки, обес­печивающих снижение объемной доли неметаллических включений и получе­ние высококачественных сварных соединений.

Рекомендации использованы при сварке магистрального трубопровода НГКМ «ВАНКОР» организацией ООО «Стройнефтегаз». Применение реко-

мендаций по выполнению сварочного процесса комбинированным способом STT+МПС на оптимальных погонных энергиях обеспечивает получение ми­нимальной доли неметаллических включений в сварных соединениях и повы- , шение характеристик усталостных свойств (приложение).

Расчет на циклическую прочность магистральных трубопроводов с уче­том величины теоретического коэффициента концентрации напряжений на границах перехода металл - шов в сварных кольцевых соединениях трубопро­водов, позволяет скорректировать рабочее давление в трубопроводе с целью безопасной эксплуатации.

**Достоверность результатов** и выводов подтверждается применением аттестованных в соответствии с нормативно-технической документацией тех­нологий сварки, применением точных и современных методов анализа (рент­геноспектрального (микрозондового) анализа, термического анализа, метода ! наноидентирования), статистической обработки данных.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы до-

*і*

ложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях и се- I минарах: всероссийская с международным участием научно-техническая кон­

ференция «Сварка и контроль - 2004», г. Пермь, 2004 г.;научно-техническая конференция «Сварка в машиностроении и металлургии» в рамках 5-й Меж- дунар. специализир. выставки «Сварка. НефтеГаз», г. Екатеринбург, 2005 г.; научно-техническая конференция «Инновационные технологии и модерниза- *\** ция в сварочном производстве» в рамках 10-й Междунар. специализир. вы­

ставки «Сварка. Контроль и диагностика», г. Екатеринбург, 2010 г.; научные семинары кафедры «Сварочное производство и ТКМ» (ПГТУ, г. Пермь) в 2004-2011 г.г.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Определена роль неметаллических включений в безопасной эксплуата­ции МТ. Установлено, что на усталостные свойства сварных соединений! МТ влияют, форма, количество, химический и минералогический состав, физико­механические свойства, химическая неоднородность неметаллических включе­ний и характер их распределения в сварных соединениях сталей трубного на­значения.
2. Для сварки корня шва оптимальной является технология STT (механи­зированная сварка проволокой в среде углекислого газа) с применением сва­рочной проволоки L-5 6; для заполняющего и облицовочного проходов стыков магистральных трубопроводові оптимально использование МПС (механизиро­ванная сварка самозащитной порошковой-проволокой) с применением свароч­ной защитной проволоки Innershield 207 или Innershield 208S (в зависимости от толщины стенки), позволяющие получать наиболее чистый сварной шов с ми­нимальным содержанием неметаллических включений.

Большинство неметаллических включений в сварных швах, выполненных тех­нологией STT+МПС, имеют эндогенное происхождение, т.е. образуются в ме­талле шва из растворенных в них примесей; и являются комплексными включе­ниями сложного состава на основе оксида кремния Si02 и сульфатов (SO4) с твердостью 2.64+3 ГПа и приведенным модулем упругости 525-^580 ГПа. Лишь небольшая часть НВ (объемная доля 0.003%) имеет экзогенное происхождение, являясь частицами шлака.

1. Установлено, что при повторном, термическом цикле многослойной сварки плавлением на коалесценцию НВ, изменение их химического состава, морфологию и распределение вфазных зонах сварных соединений, оказывают влияние термодиффузионные процессы.
2. Установлен инкубационный период зарождения усталостной трещины на сварных швах сталей 17Г1С-У и Х70, выполненных по разным технологиям,

который составляет 0.9-105^2-105 циклов для 17Г1С-У, для Х70 - 2-105-т-4-105 циклов. Дополнительными концентраторами напряжений зарождения и распро­странения трещин в металле стали 17Г1С-У являются сульфиды Fe и Мп, как одиночные, так и скопления, лежащие границе усталостной трещины, что уве­личивает скорость роста трещины на сварных швах стали 17Г1С-У в 1.2 раза, чем на сварных швах стали Х70, выполненных по одной технологии, и состав­ляет в среднем 2.5' 10‘3ч-3-10"5 мм/цикл.

1. Установлено, что для линейной части трубопроводов с кольцевыми швами характерно неравномерное напряженно-деформированное состояние. Максимальные значения напряжений создаются на границе перехода основного металла к усилению корня шва. Теоретический коэффициент концентрации на­пряжений равен 1.8 (для сварки по технологиям STT и МПС), который необхо­димо учитывать при расчете на циклическую прочность линейной части трубо­проводов.

Определено влияние НВ на изменение напряжений в металле шва сварных со­единений трубопроводов, наибольшее увеличение напряжений создается на границе включение — металл в корне шва, теоретический коэффициент концен­трации напряжений равен 1.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТРЫ

1. Гончаров И.Б. Дефектоскопия оборудования в угольной промышленности. Справочное пособ. - М:: Недра, 1990. - 150 с.: ил. ISBN 5-247-00524-4.
2. Исаев И.И. и др. Государственная приемка продукции / И.И.Исаев,

О.В.Аристов, В.И.Богданов — М.: Издательство стандартов, 1988. -20с.

1. Галдин Н.М. Цветное литье: справочник / Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук - М.: Машиностроение, 1989. - 519 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для ВУЗов. 6-е изд., перераб. и до­поли. — М: «Металлургия», 1986 - 544 с.
3. Смирнов Н.А. Современные методы анализа и контроля продуктов произ­водства. 2-е изд., дополн. и перераб. — М: «Металлургия», 1985 -256 с.
4. Лаборатория металлографии / Под ред. Лившица Б.Г. - М: Г ос. научно-техн. изд-во лит-ры по чёрной и цветной металлургии, 1957 - 696 с.
5. Шульте Ю. А. Неметаллические включения в электростали, М. .: Издатель­ство стандартов, 1964..- 319 с
6. Горицкий В.М. Диагностика металлов. - М.: Издательство стандартов, 1979. -213 с.

8: Лаборатория-металлографии. Под ред. Б.Г. Лившица. Е.В. Панченко и др. - ' Издательство металлургия. Москва, 1965. — 440с.

1. Хан Б.Х., Ящук Н.Я. Раскисление, дегазация легирование стали. Изд. 2-е пе- рараб. и дополн. - М: Металлургия, 1965. -'213 с.
2. Нарита К. Кристаллическая структура неметаллических включений в стали / Пер. с японского. - М: Металлургия, 1969. - 193с.
3. Сварка с СССР. Том 2. Теоретические основы сварки, прочности и проек­тирования. // Сварочное производство. - М.: Наука, 1981. - 300 с.
4. Прохореноко К.К. Ускоренная разливка спокойной стали сифоном. / Сб. «Вопросы производства стали». Изд. АН УССР, вып. 4. 1956. - 15 с.
5. Прохоренко К.К. Уменьшение загрязненности электростали волосови­нами и неметаллическими включениями. / Сб. «Вопросы производства стали». Изд. АН УССР, вып. 8. 1961. -20 с.