

М 421334

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 621.791.011

БЕЛЬФЕРМАН Владимир Эмануилович

ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ
КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛЕЙ ТИПА 15Х5М
ЭЛЕКТРОДАМИ ПЕРЛИТНОГО КЛАССА

05.04.05 – Технология и машины сварочного производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Москва – 1984

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте по монтажным и специальным строительным работам.

Научные руководители - д.т.н., профессор Э.А.Макаров
к.т.н., старший научный сотрудник
Ю.В.Соколов

Официальные оппоненты - д.т.н., профессор В.В.Баженов
к.т.н., доцент Ю.В.Субботин

Ведущее предприятие - Подольский машиностроительный
завод им.Серго Орджоникидзе

Защита диссертации состоится " " _____ 1984 года
на заседании специализированного Совета К053.15.03 Московского
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана
по адресу: 107006, г.Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

печатать

ке училища.

984 года

М 421334

Ямпольский

акт № 4135

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Бурное развитие нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности требует быстрого ввода в строй действующих большого количества новых установок для комплексной переработки нефти. Одним из основных элементов всех нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок являются трубные печи, предназначенные для нагрева сырой нефти перед ее переработкой. Змеевики и технологические трубопроводы этих печей, как правило, изготавливают из сталей типа 15Х5М, обладающих высокой стойкостью в горячих сероводородосодержащих средах.

Сварка этих сталей сопряжена с рядом трудностей. Наиболее высокими эксплуатационными характеристиками обладают соединения, выполненные с использованием сварочных материалов, позволяющих получить сварные швы того же структурного класса, что и основной металл. Однако, из-за их высокой склонности к образованию трещин, сварку производят с предварительным подогревом участка сварки до температур 350...400° С. Это связано с высокими затратами труда и энергии, нарушение же режима предварительного подогрева служит причиной образования трещин и, как следствие, разрушений швов и крупных аварий. Подобные аварии имели место на ряде нефтеперерабатывающих предприятий.

В связи с этим в настоящее время, в ущерб эксплуатационным характеристикам, сварку на монтаже приходится вести высоколегированными аустенитными электродами с содержанием никеля до 60%. Проходившее в декабре 1977 года во ВНИНефтемаше межведомственное совещание постановило продолжить работы по созданию материалов и технологии для получения сварных соединений из сталей типа 15Х5М со швом того же структурного класса, что и основной металл, позволяющих наряду с высокими эксплуатационными свойствами получать достаточную технологическую прочность.

Цель работы. Целью работы является обеспечение технологической прочности сварных соединений трубопроводов из сталей типа 15Х5М при сварке электродами феррито-перлитного класса без предварительного подогрева.

Методы исследования. Оценка сопротивляемости сталей типа 15Х5М образованию холодных трещин производилась по следующим методикам: а) ЛТП-3-6, заключающейся в воспроизведении на образ-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1421334

Бельферман В.Э. Оценка сва



цах ограниченных размеров термических циклов сварки в условиях предварительного насыщения водородом с последующим испытанием на замедленное разрушение постоянно действующей нагрузкой по схеме четырехточечного изгиба; б) ЛТП-2-3 при испытании сварных тавровых образцов постоянно действующей нагрузкой; в) трубных образцов на разработанном приспособлении для испытания на замедленное разрушение по методу ЛТП-2. Для определения среднего содержания водорода в наплавке использовались вакуумный метод, разработанный в ЛПИ им. Калинина, хроматографический метод, разработанный в ИЭС им. В.О.Патона, и эвдиометры, заполненные спиртом и глицирином. Оценка усадочных усилий в сварных соединениях производилась как расчетным методом через величину свободной поперечной усадки и жесткости стыка, так и экспериментально на разработанном приспособлении. Определение распределения легирующих элементов по сечению шва проводилось спектральным методом на установке ИСП-28, а также на установках МАР-I и "Камека". Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе МИМ-8 с замером микротвердости на микротвердомере ПМТ-3. Изучение фрактотграмм изломов осуществлялось на оптическом и электронном сканирующем микроскопе. Построение диаграммы термокинетического распада аустенита было выполнено при помощи быстродействующего dilatометра ЛТП-4-4 с уточнением точек начала и конца мартенситного превращения при высоких скоростях охлаждения по методу "ИНСИТУ" на болгарской установке ВМСИ-4.

Научная новизна. Установлено, что причиной разрушений стыков технологических трубопроводов нефтеперерабатывающих установок из сталей типа 15Х5М, выполненных электродами марки ЦЛ-I7 (типа Э-10Х5МФ), являются трещины, возникающие в сварных соединениях. По признакам межзеренного характера изломов и замедленной кинетики разрушения данные трещины классифицированы как холодные. Установлено, что структурный фактор, характеризующий наличие в металле сварного соединения закалочных структур, является необходимым, но недостаточным для образования трещин. Обязательным фактором возникновения трещин и определяющим сопротивляемость сталей типа 15Х5М образованию холодных трещин является наличие в металле диффузионно-подвижного водорода свыше $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Последнее предопределяет выбор технологических путей предотвращения образования холодных трещин в сварных соединениях из сталей типа 15Х5М.

Практическая ценность заключается в разработке технологии сварки сталей типа 15Х5М без предварительного подогрева электродами того же структурного класса, что и основной металл. Это стало возможным за счет комплексного воздействия на металл сварного соединения при помощи разработанной флюс-пасты ФПВ-Т и использования электродов, обеспечивающих низкое содержание диффузионно-подвижного водорода в металле шва. Предложен метод оценки сопротивляемости образованию холодных трещин реальных стыков трубопроводов, который заключается в сравнении показателя сопротивляемости образованию холодных трещин, полученного при испытании на замедленное разрушение трубных образцов, с уровнем остаточных напряжений. Последние, в стыковых соединениях труб, могут быть определены как сумма напряжений, возникающих от сварки (усадочные напряжения), а также напряжения от веса конструкции и натяга при сборке.

Апробация. Основные положения диссертации доложены на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности и качества сборочно-сварочных работ в химическом и нефтяном машиностроении", г. Волгоград, 1981 г., на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1980 и 1984 гг., а также на заседании секции "Сварочных работ и экономики" научно-технического совета во ВНИИмонтажспецстрое, г. Москва, 1982 и 1984 гг.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе и приложения. Выполнена на 160 машинописных листах, содержит 66 рисунков, 6 таблиц, III наименований используемых литературных источников и четыре приложения.

Введение. В введении отмечена актуальность разработки технологии сварки монтажных стыков трубопроводов из сталей типа 15Х5М электродами того же структурного класса, что и основной металл, без предварительного подогрева, показаны особенности, связанные со сваркой трубопроводов из сталей типа 15Х5М при монтаже. В соответствии с поставленной целью сформулированы задачи исследования:

I. Определение характера и места положения очага трещин на основе анализа случаев разрушений сварочных соединений трубопроводов из сталей типа 15Х5М на нефтеперерабатывающих установках.

2. Выявление основных факторов, определяющих сопротивляемость данной группы сталей образованию трещин.

3. Разработка способов повышения сопротивляемости образованию трещин для случая сварки соединений из сталей типа 15Х5М электродами перлитного класса без предварительного подогрева.

Глава I содержит анализ характера и места расположения трещин в стыках трубопроводов. На основании изучения случаев разрушения стыков трубопроводов из стали 15Х5М, выполненных перлитными электродами марки ЦЛ-17, на нефтеперерабатывающих установках Рязанского, Антарского и др. НПЗ выявлено, что трещины, как правило, берут свое начало в корневой части шва, распространяясь по его оси. Наиболее вероятно зарождение трещин в стыках, сечение которых ослаблено несправом. На основании фактографического анализа установлено, что разрушение в очаге зарождения трещины является хрупким, межзерненным, распространяющимся по границам действительного аустенитного зерна. Это, наряду с замедленным характером зарождения трещин, позволяет классифицировать их как холодные. Благодаря работам ряда советских и зарубежных ученых, таких как Прохоров Н.Н., Макаров Э.И., Макара А.М., Шоршоров М.Х., К.Коттрелл, И.Тривняк, Х.Гранджон и других, разработана теория образования холодных трещин при сварке. Установлено, что на сопротивляемость стыков образованию холодных трещин оказывает влияние три основных фактора: - наличие в структуре металла сварного соединения продуктов низкотемпературного распада аустенита (мартенсита и бейнита); - повышенное содержание диффузионно-подвижного водорода и высокий уровень остаточных сварочных напряжений первого рода. Причем, при сварке сталей разных классов главенствующую роль в образовании холодных трещин играют различные факторы. Так, например, на сопротивляемость образованию холодных трещин сталей при наличии в структуре сварного соединения смешанной перлитномартенситной, бейнитной или структуры низкоуглеродистого мартенсита водород оказывает наиболее сильное влияние, в то время, как при сварке среднеуглеродистых мартенситных сталей такую роль играет структурный фактор.

В главе 2 рассмотрено влияние различных факторов на сопротивляемость стали 15Х5М образованию холодных трещин.

Первым необходимым фактором, обуславливающим возникновение трещин, является структурное состояние металла сварного соединения. Для определения влияния термического цикла сварки на кинетику превращения аустенита были определены зависимости скорости охлаждения металла шва в интервале температур 500...600° для кольцевого сты-

ка трубопровода из стали марки 15Х5М диаметром 152 мм, толщиной 8 мм от погонной энергии сварки и температуры предварительного подогрева. Установлено, что скорости охлаждения в интервале температур 500...600° С находятся в пределах 45...15° С/с при изменении погонной энергии от $4 \cdot 10^5$ до $12 \cdot 10^5$ Дж/м. При применении предварительного подогрева до температуры 400° С скорость охлаждения в зависимости от погонной энергии сварки снижается до 5...
...2° С/с соответственно.

Для оценки влияния термического цикла на структуру сварного соединения dilatометрическим способом была построена диаграмма термокинетического распада аустенита для стали, содержащей 0,13% С; 0,35% Мп, 0,13% Si; 4,5% Сг и 0,35 Мо. Скорость нагрева для образцов составляла 200° С в интервале 800...900° С, что соответствовало скорости нагрева реального сварного соединения. Скорости охлаждения в интервале 600...500° С изменялись в пределах от 80 до 0,5° С/с.

Определение температур начала и конца $\gamma \rightarrow \alpha$ - превращения при охлаждении с высокими скоростями было также выполнено с помощью дифференциального термического анализа. Образцы после обработки по термическому циклу подвергались испытанию на замедленное разрушение. Нагружение проводилось по схеме четырехточечного изгиба. Перед испытанием для повышения концентрации напряжений в исследуемой зоне наносился надрез шириной 0,2 мм на глубину 1/4 от ширины образца. Испытания показали, что во всем диапазоне скоростей охлаждения вплоть до 120° С/с, образцы без напущения водородом не склонны к замедленному разрушению. То есть сталь 15Х5М, имеющая структуру малоуглеродистого мартенсита, в отсутствие водорода не склонна к замедленному разрушению.

После испытания из образцов вырезались темплеты для изготовления микрошлифов и замера микротвердости. Обработка dilatограмм и диаграмм $\Delta T = f(\Delta t/\Delta T)$, а также металлографические исследования позволили установить, что при скоростях охлаждения в интервале 600...500° С до 3° С/с структура состоит из перлита, от 3 до 9° С/с - из бейнита, а при более высоких скоростях - из мартенсита.

Исследование влияния диффузионно-подвижного водорода проводилось на тавровых образцах по методике ЛТИ-2-3 и на трубных образцах по разработанной методике ЛТИ-2-5Т при сварке электродами различной влажности. Влажность регулировалась за счет изменения степени прокалки электродов.

Показано, что насыщение водородом значительно влияет на сопротивляемость стали 15Х5М образованию холодных трещин. Оказалось, что насыщение водородом образца на базе испытания уже до $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ делает сталь потенциально склонной к замедленному разрушению. Дальнейшее насыщение диффузионно-подвижным водородом приводит к резкому понижению показателей сопротивляемости стали 15Х5М к образованию холодных трещин. При содержании диффузионно-подвижного водорода $1,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ в наплавленном металле показатель сопротивляемости составляет 300 МПа, а разрушение происходит по околосварной зоне в то время, как содержание водорода $3,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ в наплавленном металле вызывает образование холодных трещин в шве при показателе сопротивляемости лишь 70 МПа.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что влияние водорода является определяющим фактором на сопротивляемость образованию холодных трещин сталей типа 15Х5М.

Глава 3 посвящена вопросу прогнозирования образования холодных трещин в стыках трубопроводов из сталей типа 15Х5М. Для определения условий, при которых сварные соединения из стали 15Х5М склонны к образованию холодных трещин, необходимы данные об уровне остаточных напряжений в стыках трубопроводов. Поскольку для трубопроводов из данной группы сталей характерны продольные трещины в шве, показатель сопротивляемости металла необходимо сравнивать с поперечной компонентой остаточных напряжений. Некоторые составляющие напряжений, такие, как напряжение от изгиба, под действием собственного веса или оборочного натяга в трубопроводах, могут быть подсчитаны с помощью простых формул сопротивления материалов. Определение составляющей, обусловленной сваркой, имеет ряд трудностей, связанных со спецификой нагрева подвижным высококонцентрированным источником тепла и пластическими деформациями материала. Однако, решение задачи об образовании холодных трещин в стыках трубопроводов из стали типа 15Х5М сводится к определению лишь уровня остаточных сварочных поперечных напряжений.

С достаточной степенью точности данную задачу можно решить, предполагая, что значение остаточных напряжений зависит только от величины поперечной усадки и геометрической жесткости соединений, а также от неравномерности их распределения по периметру стыка.

Для того, чтобы определить величину поперечной свободной

усадки могут быть использованы различные способы расчета. Для расчета величины поперечной свободной усадки использовался метод, предложенный В.С.Игнатьевой, т.к. в нем в наиболее явной форме присутствуют параметры термического цикла сварки. Однако, для более точного определения величины поперечной свободной усадки в него были внесены следующие корректировки. Учтено несоответствие, возникшее между расчетной $B_{ш}$ и фактической шириной шва.

Если из эксперимента известна ширина шва $B_{ш}^p$, то значение поперечной усадки можно уточнить, считая размер $B_{ш}^i = B_{ш} - B_{ш}^p$ фиктивным и принимая, что аналитическая температурная зависимость совпадает с фактической при температурах, меньших $T_p = 600^\circ \text{C}$. Учтено также, что сталь типа 15Х5М претерпевает фазовые превращения. Металл испытывает увеличение линейных размеров на стадии охлаждения при относительно невысоких температурах во время перехода аустенита в мартенсит на участках, температура которых на стадии нагрева превышает температуру конца превращения $\alpha \rightarrow \gamma$. Эти участки образуют зоны полной и неполной перекристаллизации, поэтому среднее увеличение размеров составляет какую-то часть от того увеличения, которое могло бы иметь место в случае полной фазовой перекристаллизации всей зоны выше A_{c3} . Но тогда ширина зоны перекристаллизации B_{ϕ} будет содержать в себе часть фактического размера $B_{ш}$ и будет меньше фактической в (А) раз. Сопоставление ширины зоны фазовых превращений с рассчитанной при $A = 0,45$ и измеренной по шлифам сварных соединений, показало удовлетворительную сходимость.

Таким образом, поправки на ширину шва и фазовые превращения можно записать так:

$$\Delta'_{ноп} = \frac{1}{2} B_{ш}^i \cdot \alpha (T_c - T_p) + (B_{\phi} - B_{ш} \frac{A_{c3} - T_p}{T_c - T_p}) A \cdot \epsilon_{\phi}$$

T_c - температура солидус; T_p - температура потери упругих свойств; ϵ_{ϕ} - деформация фазового эффекта, в соответствии с dilatометрической кривой стали $\epsilon_{\phi} = 0,0114$.

На эту величину поправки фактическая поперечная усадка отличается от расчетной:

$$\Delta_{ноп} = \Delta'_{ноп} - \Delta'_{ноп}$$

Опробирование предложенного метода определения поперечной усадки провели при сварке образцов труб из стали 20 и 15Х5М с предварительным подогревом и без него.

Используя гипотезы одновременной усадки шва, считали, что при сварке тепло распространяется как от плоского мгновенного источника, а охлаждение до температуры окружающей среды происходит за счет теплоотдачи.

Процесс охлаждения металла, нагретого до температуры предварительного подогрева T_n , и охлаждение металла после нагрева мгновенным плоским источником происходит одновременно.

Расчеты показали, что величина поперечной усадки практически мало зависит от температуры окружающей среды, а также от температуры предварительного подогрева, если она меньше 300°C и несколько увеличивается при более высокой температуре подогрева.

Для экспериментальной оценки связи усадки с уровнем остаточных напряжений было изготовлено приспособление для определения усадочного усилия в кольцевых стыках труб. При определении уровня растягивающих напряжений сделано допущение, что напряжения в стыке распределяются равномерно, что допустимо для трубопроводов из стали 15Х5М, так как у них распределение свободной усадки имеет незначительную неравномерность по периметру трубы. Остаточные напряжения определяли по формуле:

$$\sigma = \sum \frac{N_i}{\delta \pi d_{cp}}$$

где N_i — усилия, возникающие в измерительных стержнях;

δ — толщина стенки испытываемой трубы;

d_{cp} — средний диаметр испытываемой трубы.

Одновременно на образцах-свидетелях проводилось измерение величины свободной поперечной усадки. Нахождение связи поперечной свободной усадки с уровнем напряжений проводилось также теоретически, используя формулы сопротивления материалов.

$$\sigma = \Delta l_{оп} \cdot K \quad K = \frac{E_{сж} \cdot F_{сж}}{2(F_{рас} + F_{сж})}$$

назовем K — жесткость. Нетрудно видеть, что жесткость зависит от площади сечения образца и приспособления, от длины образца и свойств материала приспособления и образца. В результате расчета построена монограмма, показывающая связь ос-

таточных напряжений от поперечной усадки с величиной свободной усадки и жесткостью стыка. Сопоставление показателя сопротивляемости образованию холодных трещин сварного соединения, выполненного по той же технологии, что и реальное сварное соединение, с уровнем остаточных напряжений свариваемой конструкции позволит прогнозировать образование трещин при изготовлении трубопровода, а также научно обоснованно назначать технологические мероприятия для борьбы с холодными трещинами.

Глава 4 посвящена исследованию технологических и металлургических путей повышения сопротивляемости сталей типа 15Х5М образованию холодных трещин. В данной главе приведен анализ существующих технологических приемов, повышающих сопротивляемость образованию трещин, показано, какие технологические приемы могут быть использованы для борьбы с холодными трещинами при сварке сталей типа 15Х5М. Предложены дополнительные технологические приемы, позволяющие повысить сопротивляемость монтажных стыков трубопроводов из сталей данного типа образованию холодных трещин. В главе описано нагружающее устройство, с помощью которого можно испытывать на сопротивляемость образованию холодных трещин образцы, имеющие одинаковую с реальным сварным соединением структуру, оvoidства и геометрию концентраторов напряжений (рис. I). Это позволяет использовать полученный показатель сопротивляемости соединений для оценки стойкости реальных сварных конструкций против образования холодных трещин. Если в свариваемой конструкции уровень растягивающих напряжений меньше показателя $\sigma_{p\min}$, полученного при испытании на данном приспособлении, трещины в ней образовываться не будут и наоборот. Причем при определении уровня напряжений необходимость учета концентраторов стпадает, ибо их влияние уже заложено в значении, полученном при испытании.

Так как содержание диффузионно-подвижного водорода является основным фактором, определяющим сопротивляемость сталей типа 15Х5М образованию холодных трещин, необходимо использовать все существующие технологические приемы, позволяющие понизить содержание диффузионно-подвижного водорода в сварном соединении. Кроме этого необходимо учесть, что при сварке трубопроводов создаются условия для интенсивного подсоса воздуха в корневую часть шва, связанные с появлением мощных конвективных потоков.

Так как трещины в соединениях из сталей типа I5X5M, как правило, располагаются в корневой части шва, то повышение сопротивляемости образованию холодных трещин корня шва приведет к увеличению сопротивляемости всего соединения в целом. Для защиты от вредного влияния атмосферы, а также для металлургического и термического воздействия на корневую часть шва была разработана флюсопаста.

Разработанный состав флюсопасты для сварки сталей типа I5X5M содержит компоненты, способные связывать водород в нерастворимые в металле соединения. Литий фтористый, который является негигроскопичной солью плавиковой кислоты, имеющий температуры плавления и кипения 870°C и 1681°C соответственно, и кальций фтористый, который, взаимодействуя в шлаковой фазе с SiO_2 , образует газ SiF_4 , связывающий водород.

Применение флюсопасты способствует получению более благоприятной формы шва и измельчению зерна в металле шва и околошовной зоны.

Для оценки влияния флюсопасты на содержание диффузионно-подвижного водорода было изготовлено приспособление для подачи влажного воздуха к корневой части свариваемого шва.

Для испытаний использовались образцы, аналогичные по размерам стандартным образцам для определения содержания диффузионно-подвижного водорода по методике ЛПИ им. Калинина. Однако, для имитации условий насыщения водородом на образцах была выполнена разделка кромок в соответствии с ГОСТ 5264-69. Образцы до сварки взвешивались с точностью до 0,01 г. После нанесения и высушивания флюсопасты в течение 10...15 минут на спокойном воздухе они вставлялись в окно камеры, в которую подавался увлажненный воздух, расход его регулировался вентилем и контролировался ротаметром. Сварка производилась на режимах, соответствующих сварке реальных стыков. Половина образцов была заварена с поддувом влажного воздуха, другая - без него. Часть образцов была сварена сырыми электродами, а часть - электродами, прокаленными в течение 1,5 часа при температуре 400°C . После наплавки образцы закалывались в воде и помещались для дегазации в эвдиометр, заполненный глицерином. Поскольку замер количества выделившегося водорода производился по методу вытеснения, необходимость подогрева эвдиометра или разбавления глицерина отпала. Высокая вязкость глицерина не мешала определению количества выделившегося

водорода.

Исследование влияния флюс-пасты при сварке прокаленными и непрокаленными электродами с поддувом влажного воздуха на содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавке показало, что в случае сварки с поддувом влажного воздуха, применение флюс-пасты снижает содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавке, при сварке непрокаленными электродами с 4 до 2,5 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ и с 2,5 до 1,8 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ в случае выполнения сварки электродами, подвергшимися прокатке в течение 1,5 часа при температуре 400° С. При сварке без поддува содержание водорода в образцах, сваренных с флюс-пастой и без нее, одинаково. Это указывает на то, что сама флюс-паста, несмотря на содержание в ней влаги, не является дополнительным источником водорода. Это связано с наличием в составе флюс-пасты компонентов, способствующих связыванию водорода в нерастворимые в металле соединения.

Исследование влияния флюс-пасты и предварительного подогрева на сопротивляемость трубных образцов образованию холодных трещин, проведенное по методу ЛТТ-2 на предложенном приспособлении показало, что в случае сварки прокаленными электродами предварительный подогрев вплоть до температур 300° С на сопротивляемость стыков труб из стали 15Х5М влияет незначительно. Это связано с тем, что структура металла сварного соединения практически не меняется, а содержание диффузионно-подвижного водорода меняется незначительно. Увеличение температуры подогрева до 400° С приводит к тому, что соединение становится не склонным к образованию холодных трещин. Это можно объяснить тем, что при таких температурах подогрева скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны в интервале температур 600...500° С снижается ниже 3° С/с и в структуре исчезают мартеновитные и бейнитные составляющие. Применение флюс-пасты приводит к повышению показателя сопротивляемости стали 15Х5М образованию холодных трещин. Это, в свою очередь, связано с уменьшением содержания диффузионно-подвижного водорода в металле сварного соединения. Большой интерес представляет влияние флюс-пасты на уровень растягивающих напряжений и механические свойства.

Замер уровня усадочных напряжений, проведенный на приспособлении для определения усадочных усилий показал, что напряжения пропорциональны величине поперечной свободной усадки. При

сварке без предварительного подогрева уровень усадочных напряжений составляет без флюс-пасты 125 МПа, с флюс-пастой - 90 МПа. Испытания показали, что при сварке без предварительного подогрева и флюс-пасты возможно образование в свариваемых соединениях холодных трещин. В то время, как в случае сварки с флюс-пастой, как впрочем, и при сварке с подогревом до температур 400° С, образования трещин не наблюдалось.

При выборе электродов для сварки сталей типа 15Х5М необходимо учитывать, что эксплуатация соединений нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок накладывает жесткие ограничения на химический состав металла шва. Изменение его в широких пределах недопустимо, так как это может привести к нежелательному ухудшению эксплуатационных свойств, а именно: коррозионной стойкости в горячих сероводородсодержащих средах, длительной прочности при повышенных температурах и т.п. Сделана попытка определить влияние марганца, ванадия и молибдена с целью установления оптимального состава для получения наивысшего показателя стойкости против образования холодных трещин и минимального содержания водорода путем изменения химического состава металла шва в пределах требований ГОСТ 9467-75. С этой целью на Московском опытном сварочном заводе были изготовлены пять партий электродов. Отличались эти электроды только содержанием ферросплавов в покрытии. Оказалось, что уменьшение содержания Fe-V в покрытии и V в металле шва не приводит к уменьшению количества диффузионно-подвижного водорода. В то же время уменьшение в составе покрытия Fe-Mn заметно уменьшает содержание диффузионно-подвижного водорода. Это благоприятно влияет на стойкость соединения против образования холодных трещин. Показатель стойкости увеличивается почти на 50%. Благоприятно также увеличение содержания в металле шва молибдена, который является элементом, стабилизирующим бейнитное превращение. Он позволяет получить структуру, которая наряду с высокой прочностью, обладает достаточной пластичностью.

В ИЭС им. Е.О.Патона были разработаны низководородистые электроды АНП-2, в состав покрытия которых входит окись железа, в процессе сварки окалина связывает водород в нерастворимый в металле комплекс ОН. На их базе для нас в ИЭС им. Е.О.Патона были изготовлены две опытные партии электродов. Для их изготовления использовались электродные стержни перлитных электродов ЦЛ-17, часть из которых перед нанесением покрытия подвергалась вакуум-

ному отжигу при температуре $800...900^{\circ}\text{C}$ в течение 1,5 часа, с целью удаления из стержня растворенного в нем металлургического водорода. Исследования данных электродов показали, что применение электродной обмазки, содержащей окись железа, и вакуумный отжиг электродного стержня благоприятно сказываются на содержании диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле. Его содержание уменьшилось с $2,4\text{ см}^3/100\text{ г}$ при сварке электродами ЦД-17 до $1,3\text{ см}^3/100\text{ г}$ при сварке электродами с обмазкой, содержащей окись железа, нанесенной на проволоку, предварительно подвергнутую вакуумному отжигу. Сопротивляемость образцов, сваренных указанными электродами была значительно выше (рис. 2). Показатель сопротивляемости этих образцов был равен 170 МПа, в то время как при сварке электродами ЦД-17 лишь 110 МПа. Таким образом, применяя низководородистые электроды для сварки сталей типа 15Х5М, можно, обеспечив заданные эксплуатационные характеристики, повысить сопротивляемость соединений образованию холодных трещин.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ случаев разрушения трубопроводов из стали 15Х5М показал, что причиной их образования при сварке перлитными электродами ЦД-17 (типа Э10Х5МЛ) являются образующиеся в металле шва трещины, зарождение которых происходит в корневой части шва. Появление данных разрушений облегчается наличием сварочных дефектов типа непроваров и несплавлений. Низкая технологическая прочность рассматриваемых соединений не позволяет производить сварку без предварительного подогрева до $350...400^{\circ}\text{C}$, что трудно выполнимо на монтаже.

2. Показано, что межзеренный характер излома и замедленная кинетика разрушения позволила классифицировать трещины в стыках трубопроводов из сталей типа 15Х5М как холодные. В результате исследования влияния различных факторов на сопротивляемость данных сталей образованию трещин установлено, что обязательным для возникновения трещин и определяющим показателем сопротивляемости образованию трещин является насыщение металла диффузионно-подвижным водородом более $0,3\text{ см}^3/100\text{ г}$. Наличие в металле закалочных структур (структурный фактор) для данных сталей является необходимым, но недостаточным условием образования трещин.

3. С целью прогнозирования условий образования трещин в сварных стыках трубопроводов предложена методика, которая предусматривает сравнение показателя сопротивляемости образованию холодных

трещин трубных образцов из исследуемых сталей и уровня напряжений, возникающих после сварки монтажных стыков трубопроводов. Для оценки сопротивляемости труб образованию холодных трещин было разработано устройство (ЛТП-2-БТ), позволяющее испытывать сварные образцы по методу ЛТП-2 на замедленное разрушение. Уровень напряжений определялся расчетным и экспериментальным путем.

4. Для повышения сопротивляемости образованию холодных трещин при сварке трубопроводов из сталей типа 15Х5М без подогрева предложена флюс-паста ФП-8-Т (А.с. № 695786), наносимая до сварки на кромки стыка со стороны корня шва. В процессе образования соединения флюс-паста, расплавляясь образует пленку шлака, которая защищает металл от потока влажного воздуха, подсосываемого во время сварки во внутреннюю полость трубы в результате эффекта эжекции. Применение флюс-пасты способствует получению более благоприятной схемы кристаллизации за счет улучшения формирования корня шва и измельчению зерна благодаря переходу в металл шва Li и Na, являющихся поверхностно-активными модификаторами, в количестве 0,003...0,005%.

5. При сварке конструкций с флюс-пастой за счет снижения величины поперечной свободной усадки до 30% снижается уровень остаточных усадочных напряжений. Флюс-паста способствует также повышению пластичности сварных соединений и не ухудшает их эксплуатационные свойства. Повышение сопротивляемости образованию трещин и снижение уровня остаточных напряжений при применении флюс-пасты позволяет сваривать без предварительного подогрева соединения с уровнем остаточных напряжений до 125 МПа.

6. Изготовлена и опробована опытная партия электродов типа 8-10Х5М, которые отличаются от электродов марки ЦЛ-17 пониженным содержанием ферромарганца и наличием окиси железа в составе покрытия, а также применением в качестве электродного стержня проволоки 10Х5М, подвергнутой вакуумному отжигу. Это позволило снизить содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле и, как следствие, повысить на 70% сопротивляемость стыков трубопроводов образованию холодных трещин.

7. Разработанный комплекс технологических и металлургических мероприятий, предусматривающий применение флюс-пасты и низководородистых электродов, обеспечивая высокую технологическую прочность сварных соединений трубопроводов из сталей типа 15Х5М, позволяет производить сварку соединений из данных сталей без предварительного подогрева.

8. Результаты работы внедрены в производство. Экономичес-

кий эффект от внедрения в тресте "Югостоктехмонтаж" составил 24 тыс.рублей в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Соколов Ю.В., Исаева Г.А., Бельферман В.Э. Исследование возможности изготовления сварных трубопроводов из стали X5M с применением флюс-пасты. - Сб.трудов /ВНИИМОС, 1977, вып.20, с.34-38.
2. Расчет поперечной усадки в сварных соединениях трубопроводов из стали марки 15X5M /Э.Л.Макаров, Ю.В.Соколов, И.Г.Некрасова, В.Э.Бельферман. - Труды /ВНИИМОС, 1978, вып.23, с.28-34.
3. Исследование условий разрушения сварных соединений трубопроводов из стали 15X5M, выполненных электродами ЦД-17. /В.Э. Бельферман, Э.Л.Макаров, Ю.В.Соколов и др. - В сб.: Исследование методов сварки. Процессы монтажа резервуаров. - М.: ВНИИМОС, 1980, с.89-93.
4. Бельферман В.Э., Макаров Э.Л., Соколов Ю.В. Оценка склонности сварных соединений трубопроводов из стали 15X5M, выполненных электродами типа ЭХ5М, к образованию холодных трещин. - В сб.: Исследование методов сварки. Процессы монтажа резервуаров. - М.: ВНИИМОС, 1980, с.93-98.
5. Бельферман В.Э., Макаров Э.Л., Соколов Ю.В. Регулирование сопротивляемости образованию холодных трещин сварных соединений трубопроводов из стали 15X5M при помощи флюс-паст. - Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Повышение эффективности и качества сборочно-сварочных работ в химическом и нефтяном машиностроении. - М.: ЦНТИхим-нефтемаш, 1981, с.53-54.
6. Бельферман В.Э., Макаров Э.Л., Слинко Д.Б. Влияние флюс-пасты на содержание диффузионно-подвижного водорода и сопротивляемость образованию холодных трещин соединений трубопроводов из стали 15X5M. - В сб.: Сооружение резервуаров и оболочек. Сварочные работы. - М.: ВНИИМОС, 1982, с.75-80.
7. Некрасова И.Г., Бельферман В.Э., Макаров Э.Л. Оценка сопротивляемости холодным трещинам кольцевых швов труб из стали 15X5M. - Сварочное производство, 1983, № 3, с.8-10.

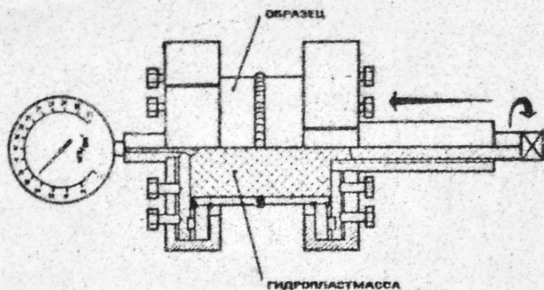


Рис. 1. Приспособление для определения сопротивления стыков трубопроводов образованию холодных трещин.

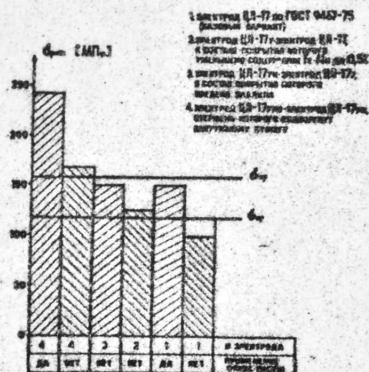


Рис. 2. Влияние предлагаемых технологических мероприятий на сопротивление образованию холодных трещин труб из стали 15Х5М.

