

Национальная Академия наук Украины  
Институт электросварки имени Е.О. Патона

экз N

На правах рукописи

Лактионов  
Михаил Александрович

УДК 621.791.753.042.5:669.15-194.2

Технология сварки под флюсом аустенитной проволокой  
хладостойких низколегированных высокопрочных сталей.

Специальность 05.03.06

"Технология и оборудование для сварки  
и родственных процессов"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1996



Работа выполнена в Институте электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины и в Сумском машиностроительном научно-производственном объединении им. М.В. Фрунзе.

Научный руководитель: доктор технических наук  
Готальский Ю.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Кузнецов В.Д.

кандидат технических наук  
Бреднев В.И.

Ведущее предприятие: АО "Насосэнергомаш"

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации Лактионова М.А. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании специализированного совета или прислать свои отзывы (1 экз., заверенный печатью) по адресу: 252650, Киев, ГСП, ул.Боженко, 11, ученому секретарю спецсовета.

Защита состоится "28" 05 1997 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета (К50.02.02) при Институте электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке института.

Автореферат разослан "24" 04 1997 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00753529 (V)

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор технических наук

А.А. Бондарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ.** Одним из видов продукции химического машиностроения являются линии низкотемпературного разделения углеводородов природного газа. В этих линиях крупногабаритные колонны и теплообменные аппараты, эксплуатирующиеся при температуре не ниже 163К, изготавливаются из низколегированных высокопрочных сталей ( в дальнейшем НЛВП стали) АК-25 и АК-27, имеющих предел текучести на уровне 600 МПа. Большие габариты изделия (диаметр до 4,0м, высота до 50м, толщина стенки в пределах 0,02...0,07м) не позволяют выполнить сложную термообработку сварных конструкций. Поэтому хладостойкость сварных соединений обеспечивается применением высоконикелевых аустенитных электродов марки ЭА-395/9. Ввиду высокой склонности аустенитных швов к горячим трещинам, сварка выполняется с ограничением режимов и площади наплавленного металла за один проход. Для обеспечения равнопрочности аустенитного металла шва с основным металлом сварные соединения выполняются с повышенным усилением, что требует больших трудозатрат, высокий расход дорогостоящих электродов и длительный цикл изготовления изделий. Отрицательное влияние этих факторов можно значительно снизить применением механизированной сварки под слоем флюса, но имеющиеся сварочные материалы не обеспечивают требуемый уровень технологической прочности. Вопрос оптимизации химических составов дорогостоящих аустенитных материалов для сварки НЛВП сталей в конструкциях с отрицательными температурами эксплуатации практически не изучен.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Разработать технологию сварки под флюсом аустенитной проволокой низколегированных высокопрочных сталей в конструкциях с минимальной температурой эксплуатации 163К.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить влияние состава сварочной ванны и технологических факторов на структуру и свойства зоны сплавления разнородных сталей.
2. Исследовать влияние технологических и металлургических факторов на склонность аустенитного металла шва к горячим трещинам.
3. Исследовать влияние комплексного легирования и модифицирования на уровень прочностных свойств металла шва со стабильноаустенитной структурой.
4. Разработать сочетание сварочной проволоки и флюса и технологии сварки, которые обеспечат требуемый комплекс свойств сварных соединений НЛВП сталей при температуре эксплуатации 163К.

И. В. Стефанюк  
АН Украины

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА.** Разработана оригинальная методика исследований, позволившая установить прямую взаимосвязь между хладостойкостью зоны сплавления разнородных сталей и шириной мартенситной прослойки, образующейся в этой зоне. Развито представление о механизме влияния металлургических и технологических факторов на мартенситную прослойку. Показано, что главным фактором регулирования ширины мартенситной прослойки является содержание никеля в металле шва. В результате исследований получена зависимость "критического" (минимально допустимого) уровня легирования аустенитного шва никелем от температуры эксплуатации сварных соединений НЛВП сталей в диапазоне температур 203...153К.

Предложен механизм влияния высокого содержания никеля в аустенитном шве на ширину мартенситной прослойки переходного слоя зоны сплавления разнородных сталей, основанный на способности никеля увеличивать скорость и время прохождения диффузионных процессов между жидкой сварочной ванной и твердо-жидкой областью основного металла на границе сплавления.

Изучено влияние раздельного и комплексного легирования W, Ti, Mo и Mn однофазного аустенитного шва типа X25H25 на его технологическую прочность. Показана эффективность комплексного легирования молибденом и марганцем и установлены оптимальные содержания их в металле шва: 4...6%Mo и 4...7% Mn.

В результате исследований влияния компонентов шихты керамического флюса на однофазный аустенитный шов установлена эффективность дополнения шихты флюса АНФ-6 фтористым барием (3%), гематитом (3%), алюмомагниевым порошком (2,5%) и феррохромбором (0,2%). Такое соотношение компонентов шихты флюса обеспечивает повышение стойкости аустенитных швов против горячих трещин в 1,6 раза и прочностных характеристик наплавленного металла на 25%.

**НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ** результаты исследований: зависимость уровня легирования аустенитного шва никелем от температуры эксплуатации сварных соединений НЛВП сталей в диапазоне температур 203...153К; химический состав проволоки ЭК-56, который при сварке под флюсом АН-18 обеспечивает требуемый уровень хладостойкости сварных соединений НЛВП сталей и приемлемый уровень технологической прочности; соотношение компонентов шихты флюса АНК-70, который в сочетании с проволокой ЭК-56 обеспечивает высокую технологичность процесса сварки и повышение комплекса свойств сварных соединений НЛВП сталей.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ.** На основании выполненных исследований разработаны сварочные материалы: проволока ЭК-56 (св-06Х20Н25М6Г8) и флюс марки АНК-70, а также технология св. эки сталей АК-25 и АК-27, обеспечивающие требуемый комплекс свойств сварных соединений.

Решена задача замены ручной сварки механизированной под флюсом низколегированных высокопрочных сталей в конструкциях с температурой эксплуатации 163К, позволившая увеличить в пять раз производительность труда, на 20% снизить расход дорогостоящих сварочных материалов и значительно улучшить санитарно-гигиенические условия труда варщиков. Результаты работы позволяют производить выбор аустенитных сварочных материалов в зависимости от температуры эксплуатации сварных соединений НЛВП сталей в диапазоне температур 203...153К.

Приведенные выше технологии внедрены в производство на Сумском МНПО им. М.В.Фрунзе.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Основные материалы диссертации докладывались на семинарах по сварочному производству (г.Киев, 1986 и 1987 г.г.), на конференции по новым технологиям в машиностроении (г.Тула, 1988г.), на семинарах по сварочному производству (г.Сумы, 1986, 1990, 1991 г.г.), технологическом семинаре ИЭС им. Е.О.Патона (1996 г.). Разработанная технология была согласована институтами ЛЕННИИХиммаш и ВНИИПТХимнефтеаппаратуры и утверждена Минхимнефтемашем СССР для применения при изготовлении продукции, подведомственной Госгортехнадзору.

**ПУБЛИКАЦИИ.** Основное содержание работы изложено в 4 статьях и 2-х авторских свидетельствах.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по главам, общих выводов по работе, списка литературы и приложений. Текстовая часть работы содержит 128 страниц машинописного текста, 68 рисунков и 33 таблицы.

**ВО ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и основные научные положения, выносимые на защиту.

**В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** на основании литературных данных анализируются проблемы, возникающие при сварке НЛВП сталей. Рассматриваются факторы, определяющие хладостойкость сварных соединений низколегированных сталей, выполненных аустенитным швом. Анализируются возможные пути повышения технологической прочности аустенитного металла шва. Формируются цели и задачи исследований.

**ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ** приведены результаты исследований влияния металлургических факторов на структуру и свойства зоны сплавления разнородных сталей. Определены количественные взаимозависимости ширины мартенситной прослойки зоны сплавления и ударной вязкости этой зоны от содержания никеля в аустенитном металле шва. Получена прямая зависимость "критического" содержания никеля в аустенитном шве от температуры эксплуатации сварных соединений НЛВП сталей. Определено, что для температуры 163К сварочная проволока должна иметь в своем составе 25% никеля.

Технологические факторы - составляющие режима сварки и технологические приемы: вибрация свариваемого изделия, электромагнитное перемешивание сварочной ванны, двухдуговая сварка типа "Тандем"-исследованы и с точки зрения повышения технологической прочности. Определены наиболее благоприятные диапазоны режимов и показана перспективность двухдуговой сварки типа "Тандем". Исследование технологических факторов показало, что их влияние на ширину мартенситной прослойки обусловлено в конечном итоге изменением содержания никеля в наплавленном металле. Полученные результаты позволили расширить представление о механизме влияния высокого содержания никеля в аустенитном шве на ширину мартенситной прослойки зоны сплавления разнородных сталей.

**В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ** исследовано влияние отдельного и комплексного легирования W, Ti, Mo и Mn аустенитного металла шва типа X25H25 на склонность его к горячим трещинам. Показана эффективность комплексного легирования молибденом и марганцем и установлены их оптимальные содержания в сварочной проволоке. Разработана проволока марки ЭК-56 (св-06X20H25M6Г8) для сварки кладостойких НЛВП сталей.

В результате исследований влияния компонентов шихты, керамического флюса на однофазный аустенитный шов установлено оптимальное соотношение в нем фтористого бария, гематита, алюмомагниевого порошка и феррохромбора (основа - флюс АНФ-6). Показано, что разработанный флюс марки АНК-70 позволяет значительно повысить стойкость против горячих трещин и прочностные характеристики аустенитного шва.

**В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ** представлена технология сварки проволокой ЭК-56 под флюсами АН-18 и АНК-70. Промежуточные результаты исследований позволили разработать технологию плакировки аустенитными ленточными электродами трубных решеток из стали АК-27 для приварки к ним труб из стали 12Х18Н10Т. Приведено сравнение свойств сварных соединений, полученных по разработанной и существующей технологии. Показаны преимущества первой.

Приведены результаты внедрения разработок.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

При разработке технологии сварки под флюсом аустенитной проволокой конструкций из НЛВП сталей с минимальной температурой эксплуатации 163К необходимо решить две основных задачи: обеспечить хладостойкость зоны сплавления и технологическую прочность металла шва. Наиболее обстоятельно зона сплавления разнородных сталей исследовалась в работах В.Н.Земзина, Л.С.Лившица, Г.Л.Петрова, В.И.Брука, Ю.Н. Готальского и др. Исходные положения современной теории образования горячих трещин были развиты А.А.Бочваром, Н.Н.Прохоровым, В.А.Мовчаном, М.К.Шоршо-ровым и др.

Общепризнано, что работоспособность разнородного сварного соединения определяется зоной сплавления и, в частности, шириной мартенситной прослойки переходного слоя этой зоны (в дальнейшем  $V_m$ ). Возникновение этой прослойки связывается со слабым перемешиванием сварочной ванны у ее границы. Поэтому предполагается возможность регулирования  $V_m$  изменением режимных факторов процесса сварки и применением технологических приемов, способствующих перемешиванию сварочной ванны у ее границы. Основным способом уменьшения  $V_m$  является применение сварочных материалов, обеспечивающих в металле шва аустенит с высоким содержанием никеля. Механизм положительного влияния высокого содержания никеля еще не совсем ясен. Никель является остродефицитным элементом, к тому же, увеличение содержания никеля в проволоке повышает вероятность появления горячих трещин в наплавленном металле. Вопрос оптимизации уровня легирования никелем аустенитной проволоки, предназначенной для сварки НЛВП сталей в конструкциях с отрицательной температурой эксплуатации, практически не изучен. Эти факторы предопределили необходимость исследований влияния технологических и металлургических факторов на структуру и свойства переходной зоны сплавления разнородных сталей. Анализ применявшихся ранее методик исследований показал существенные их недостатки:

- прямой скос одной из свариваемых кромок не обеспечивает при сварке прямолинейную границу сплавления, что особенно затруднительно при механизированной сварке;
- при выполнении многопроходных швов в разделку практически невозможно обеспечить стабильную переходную зону в направлении от корня шва к его поверхности, так как степень разбавления сварочной ванны основным металлом изменяется с каждым проходом;
- отсутствует надежный способ барьирования содержанием никеля в

аустенитном шве при сохранении стабильного содержания других элементов

- высокая склонность аустенитных швов к горячим трещинам.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В АУСТЕНИТНОМ ШВЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ.**

Проблема исключения недостатков существующих методик исследований была решена путем получения сварных соединений методом многослойной наплавки ленточным электродом на пластины толщиной 60мм из стали АК-27. К достоинствам разработанной методики относится также и то, что технология получения проб довольно проста, а в результате получено из одной пробы значительное количество образцов для испытания на ударный изгиб по прямолинейной линии сплавления. Содержание никеля в первом слое наплавки варьировали применяя следующие марки электродных лент: 08X19N10Г2Б, 07X25N13, 10X16N25AM6 и 06X23N28M3ДЗТ, а также предварительным плазменным напылением никелевого порошка ПНЭ-1 на наплавляемую поверхность. Из наплавленных пластин были изготовлены образцы для металлографических исследований и для испытания на ударный изгиб с надрезом Менаже по линии сплавления.

Ширину мартенситной прослойки переходного слоя зоны сплавления (Вм) определяли расчетно-экспериментальным методом. Расчетная часть метода основана на структурной диаграмме Шеффлера. На этой диаграмме нанесли гаммы точек, определяющих структурное состояние переходной зоны от основного металла к наплавленному. По этой диаграмме для каждого варианта наплавки определяли содержание никеля, хрома и молибдена в точках перехода от мартенситной структуры к мартенситно-аустенитной. Экспериментальная часть метода включает в себя получение графиков локального распределения никеля, хрома и молибдена в зоне сплавления аустенитных наплавки с основным металлом и определение на полученных графиках ширины участков с мартенситной структурой. Полученные результаты приведены в таблице 1. На основании этих данных построена зависимость Вм от содержания никеля в аустенитном наплавленном металле (рис.1). На этом же рисунке показаны зависимости ударной вязкости зоны сплавления от содержания никеля в аустенитной наплавке. Учитывая, что минимальный допустимый уровень ударной вязкости составляет 30 Дж/см<sup>2</sup>, определили критические значения Вм и содержания никеля в аустенитной наплавке для указанных температур испытаний (см. рис.1). Эти данные позволили построить графики зависимостей критических значений Вм и содержания никеля в аустенитной наплавке от

температуры эксплуатации сварных соединений в диапазоне температур 203...153К (рис.2).

Известно, что по режимным факторам и степени проплавления процессы наплавки ленточным электродом и сварка проволокой имеют значительные отличия. Поэтому были выполнены наплавки проволочным электродом по трем присадкам и сварка стыковых соединений проволоками с различным содержанием никеля (табл.1). Расчетно-экспериментальным методом определили в каждом случае ширину мартенситной прослойки. Анализ полученных результатов и построение обобщенного графика зависимости мартенситной прослойки от содержания никеля в наплавленном металле показали хорошую совместимость результатов для исследованных случаев сварки и наплавки. Тогда правомерно распространить зависимости, полученные при исследовании наплавки ленточным электродом и на случай сварки проволочным электродом. Как показывают эти зависимости для температуры эксплуатации 163К в наплавленном металле должно быть не менее 12,5% никеля. Учитывая, что при механизированной сварке под флюсом степень разбавления металла сварочной ванны основным может достигать до 50%, определили оптимальное содержание никеля в сварочной проволоке, которое составляет 25%.

Учитывая предполагаемую возможность сужения Вм при помощи технологических приемов, была сделана попытка снизить содержание никеля в проволоке путем применения электромагнитного перемешивания (ЭМП) сварочной ванны, вибрации свариваемого изделия и применением двухдуговой сварки в общую ванну типа "Тандем". Выбор указанных технологических приемов основан не только на возможности перемешивания металла сварочной ванны у ее границы, но и с учетом влияния их на склонность аустенитных швов к горячим трещинам. Для проведения исследований была выбрана проволока св-10Х16Н25АМ6 и флюс марки АН-18. Выбор этой проволоки обусловлен тем, что она содержит 25% никеля и именно из этой проволоки изготавливают электроды ЭА-395/9.

Методика исследований технологических приемов состояла в следующем. Из стали АК-25 толщиной 28 мм были изготовлены стыковые соединения с К-образной разделкой кромок. С одной стороны выполнена сварка электродами ЭА-395/9, после чего на строгальном станке вырезан корень шва с шириной вырезки в корне 10 мм. Такая подготовка проб позволяет снизить влияние неравномерности степени проплавления корневых проходов при применении различных технологических приемов, облегчает задачу равномерного проплавления ровной кромки и снижает вероятность появления горячих трещин в шве. Сварка выполнялась на трех базовых режимах, предусматривающих

Таблица 1. Определение Вм

Вид сварного соединения	Марка сварочного материала	% Ni в первом слое наплавки или в сварном шве	Вм, мкм
Наплавка ленточным электродом	08X19H10Г2Б	7,5	33
	07X25H13	10,0	26
	07X25H13+ПНЭ-1	18,0	10
	10X16H25AM6	19,0	8
	06X23H28M3ДЗТ	21,5	4
	06X23H28M3ДЗТ+ПНЭ-1	27,5	3
Наплавка проволокой по 3-м присадкам	06X19H9Т	5,5	36
	07X25H13	9,0	28
	13X25H18	13,0	21
	06X25H25M3	15,0	18
	10X16H25AM6	18,0	11
	ХН78Т	52,0	2
Сварка стыковых соединений проволокой	04X19H11M3	8,0	30
	08X25H13БТЮ	9,5	24
	01X19H19Г10AM4	13,0	20
	10X16H25AM6	19,0	8
	10X16H25AM6	13,0	20
	06X25H40M7	30,0	2
06X25H60M15	41,0	2	

Таблица 2. Результаты исследования технологических приемов.

Наименование приема	N базового режима	% Ni в шве	Вм, мм	KCU* Дж/м 10	Трещины + есть - нет	Угол загиба, град.
	I	18	10	125	+	65/75
	II	12	22	50	++	40/55
	III	13,5	18	70	+	60/70
ЭМП	I	18	12	90	++	40/50
	II	14	20	50	++	60/35
	III	16	12	80	+	90/80
"Тандем"	I	20	5	140	+	50/50
	II	16	14	60	+	90/80
	III	18,5	8	100	+	90/85
Вибрация	I	16	15	60	++	40/50
	II	12	22	45	++	45/55

Примечание: \* KCU по линии сплавления при температуре испытания 163К;  
 + - трещины на макрошлифах; ++ - трещины на поверхности шва.

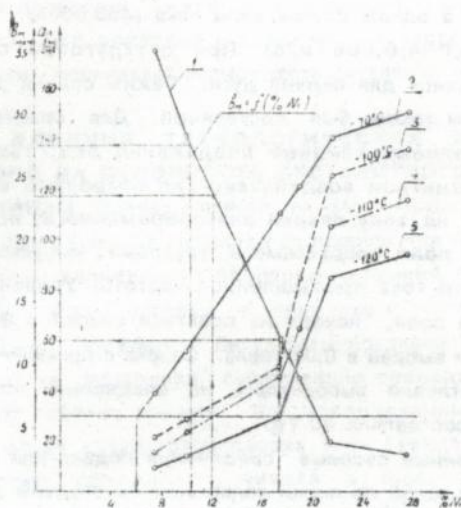


Рис. 1 Зависимости ширины мартенситной прослойки и ударной вязкости зоны сплавления от содержания никеля в выплавленном металле.

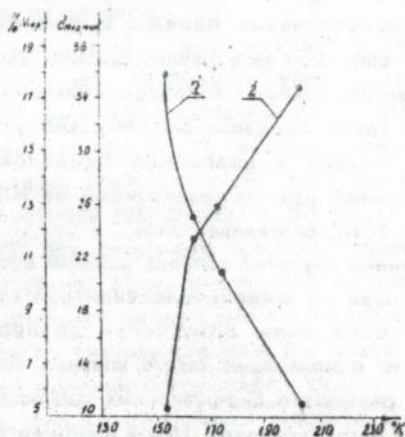


Рис. 2 Зависимости критической ширины мартенситной прослойки (1) и критического содержания никеля в аустенитной наплавке (2) от температуры испытания.

изменение в одном случае силы тока (400;500А), в другом случае скорости сварки (0,004;0,006 м/с). При двухдуговой сварке базовые режимы использовались для первой дуги. Режим сварки для второй дуги, питаемой переменным током, был постоянный. Для сравнения на базовых режимах были выполнены сварные соединения без технологических приемов. Электромагнитное воздействие на сварочную ванну осуществлено путем наложения на зону сварки знакопеременного, прерывистого, аксиального магнитного поля, создаваемого группами импульсов тока, выделенными из переменного тока промышленной частоты. Уровень индукции управляющего магнитного поля, исходя из практики сварки с ЭМП стабильноаустенитных сталей, был выбран в 0,03 тесла. Сварка с применением вибрации в процессе ее осуществления выполнялась на специально созданной установке. Частота вибрации составляла 40 Гц.

Полученные сварные соединения подвергали механическим испытаниям на ударный изгиб по линии сплавления со стороны ровной кромки, испытаниям на угол загиба в двух уровнях и металлографическим исследованиям. Результаты определения  $B_m$ , полученные расчетно-экспериментальным путем, приведены в табл. 2. Эти результаты хорошо согласуются с данными таблицы 1. По-видимому, влияние режимных факторов и технологических приемов обусловлено в конечном итоге изменением содержания никеля в аустенитном наплавленном металле.

Полученные результаты показали, что при механизированной сварке под флюсом технологические приемы и режимные факторы не являются эффективным способом уменьшения ширины  $B_m$  и, следовательно, не могут быть инструментом снижения содержания никеля в аустенитном шве при сварке НЛВП сталей. Таким образом, окончательно установлено, что оптимальное содержание никеля в сварочной проволоке, предназначенной для механизированной сварки конструкций из НЛВП сталей с температурой эксплуатации 163К, составляет 25%.

Всестороннее изучение вопроса влияния высокого содержания никеля в аустенитном шве на ширину мартенситной прослойки, образующейся в переходном слое зоны сплавления разнородных сталей, привело к предположению о механизме такого влияния. По-видимому, переходной слой образуется в результате диффузионных процессов между сварочной ванной и прилегающей жидко-твердой зоной основного металла. Диффузия никеля приводит к значительному снижению температуры плавления получаемых переходных сплавов, т.е. способствует переходу части упомянутой зоны в жидкое состояние, где процессы диффузии еще больше интенсифицируются. Таким образом, никель способствует увеличению скорости и времени

протекания диффузионных процессов между жидкой ванной и жидко-твердой зоной основного металла, что приводит к сужению той части этой зоны, химический состав которой определяет возможность появления мартенситной структуры

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СКЛОННОСТЬ АУСТЕНИТНОГО МЕТАЛЛА ШВА К ГОРЯЧИМ ТРЕЩИНАМ.** Оценку влияния технологических приемов на склонность аустенитных швов к горячим трещинам проводили при исследовании макрошлифов и испытанием специальных образцов толщиной 4мм на угол загиба, которые вырезались в двух уровнях: в корне шва и с поверхностного слоя наплавленного металла. Полученные результаты показали (табл.2), что технологические приемы не позволили существенно повысить стойкость аустенитных швов против горячих трещин. Из исследованных приемов представляет интерес только двухдуговая сварка типа "Тандем", которая способствует увеличению содержания никеля в шве, повышению технологической прочности наплавленного металла и позволяет значительно поднять производительность процесса. Учитывая известное положительное влияние импульсной дуги на технологическую прочность аустенитных швов, были выполнены многочисленные эксперименты в этом направлении. Установлено, что значительное повышение стойкости аустенитного наплавленного металла против горячих трещин (в 1,4 раза) связано с ухудшением формирования шва. При этом полностью избавиться от горячих трещин на приемлемых режимах сварки не удалось.

Полученные результаты показали, что проволока марки ЭП-395 (10X16H25AM6) не обеспечивает требуемый уровень технологической прочности аустенитных швов при механизированной сварке НЛВП сталей. Из существующих проволок были выбраны еще 3, которые наряду с 25% никеля содержат элементы, повышающие стойкость аустенитных швов против горячих трещин. Проверку проволок ЭП-622 (06X25H25M3), ЭП-88 (10X15H25B6M3Г7) и ЭП-420 (08X15H25M3B6Г5Т2) осуществляли в процессе заварки под флюсом АН-18 V-образных канавок глубиной 15мм, выполненных на пластине из стали АК-27 толщиной 60мм. О стойкости металла шва против образования горячих трещин судили по результатам визуального осмотра поверхности каждого наплавленного валика и при изучении макрошлифов. Исследования показали, что увеличение сварочного тока, напряжения и скорости сварки повышает вероятность образования горячих трещин. На более благоприятный диапазон скоростей сварки ( $3...4,5 \times 10^{-3}$  м/с. При таких скоростях наименьшее количество макрошлифов поражено трещинами. Многочисленные пробы с изменением диаметров проволок и составляющих режима сварки показали непригодность

существующих проволок для механизированной сварки НЛВП сталей из-за низкого уровня технологической прочности швов.

В связи с тем, что технологические факторы не позволили достичь поставленной цели, было решено путем исследований металлургических возможностей снижения склонности аустенитных швов к горячим трещинам разработать новую сварочную проволоку, содержащую 25% никеля и обеспечивающую при механизированной сварке под флюсом приемлемый уровень технологической прочности.

Для решения поставленной задачи намечено было взять за основу проволоку ЭП-622 и определить оптимальное содержание в ней элементов, снижающих склонность аустенитных швов к горячим трещинам. Изменение содержания исследуемого элемента в сварном шве производилось с помощью добавок во флюс АН-18 гранулированной присадки из легирующего элемента, а также выплавкой сплава и изготовлением опытных проволок заданного химического состава. Оценку дополнительного легирования на трещиностойчивость шва проводили внешним осмотром и изучением макро- и микрошлифов заваренных V-образных канавок. Сварка выполнялась на режиме:  $I_{св}=400A$ ,  $U_d=32B$ ,  $V_{св}=0,003м/с$ .

При долегировании молибденом через флюс в сварном шве были получены следующие его значения (в %): 4,7, 8, 10, 15, 21. В диапазоне 7...10% Мо трещины на макрошлифах не обнаружены. При 21% Мо весь шов поражен трещинами. При 4% и 15% Мо трещины обнаружены на макрошлифах. Попытка изготовить проволоку типа Х25Н25 с содержанием молибдена в пределах 5...8% не удалась - при обработке слитков прокат растрескивался. Тогда было решено оставить содержание молибдена в проволоке на уровне 3% и опробовать долегирование шва вольфрамом. Были получены следующие значения этого элемента в сварном шве (в %): 1; 1,5; 2; 2,5; 3,6. Во всех случаях на макрошлифах обнаружены трещины.

Известно положительное влияние марганца на стойкость аустенитных швов к горячим трещинам. К тому же марганец является элементом - аустенизатором, что немаловажно при сварке НЛВП сталей аустенитным швом. В результате долегирования марганцем в металле шва были получены следующие его содержания (%): 2,3, 4, 5, 6, 8, 11. Сварка проволокой ЭП-622 показала, что долегирование шва марганцем лишь несколько снижает вероятность образования трещин и только до содержания его в наплавленном металле порядка 6%. Для получения более полных данных по влиянию марганца были изготовлены проволоки типа ЭП-622 с повышенным содержанием марганца (в %): 4,1; 6,3; 7,4; 7,6; 9,8; 12. Следует отметить, что из плавок с повышенным содержанием марганца проволоки изготавливаются вполне удовлетворительно.

По результатам изучения макрошлифов сварных проб определили, что оптимальное содержание марганца в проволоке составляет 7...8%. Однако полностью устранить трещины не удается и при таком содержании. Поэтому в дальнейшем были проведены эксперименты с целью выяснения возможности предотвращения горячих трещин путем долегирования шва молибденом при наличии в нем марганца порядка 6%. При сварке проволокой ЭП-622 и комплексном долегировании молибденом и марганцем получены варианты швов, содержащие молибдена 4...6% и марганца 4...7%. На макрошлифах этих швов трещин не обнаружено. Для проверки такого легирования металла шва были выполнены плавки типа Х25Н25 с комплексным легированием молибденом (5...7%) и марганцем (6...8%). К сожалению, даже при повышенном содержании марганца проволоку с молибденом более 6% изготовить не удалось. Сварка опытной проволокой состава 03Х25Н25М5Г7 V-образных канавок показала отсутствие горячих трещин в сварных швах. В процессе оформления технических условий на поставку новой сварочной проволоки, исходя из опыта лабораторного изготовления проволоки и условий специфики производства завода-поставщика, был скорректирован химический состав проволоки. В окончательном варианте разработанной проволоке присвоена марка Св-06Х20Н25М6Г8. Условное заводское обозначение марки проволоки ЭК-56 ТУ 14-1-3509. Механические свойства наплавленного под флюсом металла шва показаны в табл.5. Сравнительная оценка проволоки св-10Х16Н25АМ6 с разработанной св-06Х20Н25М6Г8 по методике МВТУ им.Баумана на установке ЛТП 1-6 показала, что последняя обеспечивает в 1,5 раза выше стойкость против образования горячих трещин в металле шва. Сварка V-образных канавок и "жестких" проб из стали АК-25 проволокой ЭК-56 под флюсом АН-18 показала, что при ограничении силы тока до 450А и скорости сварки до 0,0035 м/с гарантировано получение швов без горячих трещин.

С целью расширения диапазонов режима сварки и повышения прочностных характеристик металла шва было опробовано ряд флюсов: АН-45, АНК-45, АН-15М, 48-ОФ-10. Ни в одном случае положительного результата не получено. Учитывая широкие возможности комплексного легирования и модифицирования аустенитных швов через керамический флюс, решено было выполнить исследования в этом направлении.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА УРОВЕНЬ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ШВА СО СТАБИЛЬНОАУСТЕНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ.** В качестве базовой была выбрана шлаковая система флюса АНФ-6:  $\text{CaF}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ . Первые два компонента составляют основу флюсов для сварки аустенитными

проволоками, а неизбежность присутствия кремнезема predeterminedena применением при изготовлении флюса жидкого стекла.

Для оценки склонности металла шва к горячим трещинам выполнялась заварка V-образных канавок. Режим сварки:  $I_{св}=500A$ ;  $U_d=32B$ . В качестве показателя была выбрана минимальная скорость сварки, при которой не наблюдается образование горячих трещин.

Эксперименты показали, что предотвратить образование горячих трещин под флюсом АНФ-6 при скорости 0,0035 м/с нельзя. Для снижения активности  $SiO_2$  в шлаке была изготовлена серия опытных флюсов с различным содержанием  $BaF_2$ . В таблице 3 приведены составы опытных флюсов и соответствующие критические скорости сварки под этими флюсами V-образных канавок. Из приведенных данных видно, что с ростом содержания  $BaF_2$  во флюсе растет стойкость металла шва против горячего растрескивания. Однако, повышение  $BaF_2$  свыше 3% приводит к "укорочению" шлака, что вызывает значительное ухудшение формирования металла шва. Поэтому для увеличения критической скорости сварки были проведены исследования возможности повышения окислительного потенциала флюса за счет введения в его состав гематита (Табл. 3). Из приведенных данных видно, что как самостоятельное введение гематита, так и комплексное введение гематита более 3% не увеличивает критическую скорость. В то же время, введение 3% гематита резко ухудшает отделимость шлаковой корки с поверхности шва.

С целью сохранения хороших технологических свойств флюса и поддержания оптимального содержания кислорода в металле шва решено было применить в качестве раскислителя порошок алюмомagneйского сплава. Испытание серии опытных флюсов позволили установить, что приемлемые сварочно-технологические свойства достигаются при введении 2,5% алюмомagneйского порошка (Табл. 3, состав N56).

На основании известного положительного влияния микродобавок бора на структуру и свойства аустенитного металла была изготовлена серия опытных флюсов на основе состава N56 с добавлением феррохромбора (Табл. 3). Металлографические исследования опытных проб показали, что введение уже 0,1% феррохромбора вызывает существенное измельчение структуры, что сразу отражается на механических свойствах металла шва (Табл.4). Как показывают данные табл.4 оптимальным является введение 0,2% феррохромбора. Заварка V-образных канавок проволокой ЭК-56 под флюсом N56 показала, что в интервале сварочных токов 450...600A допустимо ведение сварки со скоростью до 0,007 м/с без опасности появления горячих трещин в металле шва. При напряжении дуги в интервале 30...38В обеспечивается

Таблица N3. Определение влияния компонентов флюса на технологическую прочность и предел текучести аустенитного шва.

Наименование компонента	№ варианта флюса / содержание компонента в шихте флюса (в %)														
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	56	57	58	59	60	61
АНФ-6	97	94	91	97	94	91	94	91	88	91,5	91,4	91,3	91,2	91,1	91
ВаF <sub>2</sub>	3	6	9	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Гематит	-	-	-	3	6	9	3	6	9	3	3	3	3	3	3
ПАМ-4										2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
ФХБ-1											0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Укр м/с 10 <sup>3</sup>	4,3	4,5	4,8	4,8	4,8	4,8	5,5	5,5	5,5	5,6	6,0	6,4	6,2	5,9	5,6
σ <sub>0,2</sub> МПа										400	450	480	470	460	460

Таблица 4. Режимы сварки и свойства сварных соединений стали АК-25.

№ п/п	Сварочные материалы	Режимы сварки			Характеристика швов			
		Jд. А	Уд. В	Усв., м/с 10 <sup>3</sup>	σ <sub>0,2</sub>	σ <sub>в</sub>	δ <sub>5</sub>	ψ
					МПа	МПа%	%	
1.	ЭА-395/9 5мм	140...180	24...28	-	480	660	32	54
2.	ЭК-56 и АН-18	350...450	32...36	3...3,5	350	590	35	55
3.	ЭК-56 и АНК-70	400...600	32...38	3...8	460	640	30	53

хорошая отделимость шлаковой корки из раздалок с углом раскрытия кромок 40...60. Флюс обеспечивает получение плавного перехода от шва к основному металлу и гладкую блестящую поверхность валика. Разработанному флюсу присвоена марка АНК-70 (ТУ ИЭС 798-91). Сварка "жестких" проб из стали АК-25 проволокой ЭК-56 под флюсом АНК-70 подтвердила высокий уровень технологичности процесса и повышение прочностных характеристик аустенитного металла шва (табл.4).

**ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ НЛВП СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНЫМ ШВОМ.** В результате проведенных в настоящей работе исследований достигнута ее цель: разработана технология сварки под флюсом аустенитной проволокой конструкций из НЛВП сталей с минимальной температурой эксплуатации 163К. Сварка выполняется проволокой ЭК-56 под флюсом АНК-70 (допустимо применение флюса АН-18) на режимах, указанных в табл.5. Сравнение свойств сварных соединений, полученных по разработанной технологии и с применением электродов ЭА-395/9, показало:

- прочностные и пластические характеристики металла швов, значение истинных напряжений разрушения  $\sigma_k$ , коэффициентов интенсивности напряжений  $K_{s1}$ , критического раскрытия трещин и сопротивления микросколу для обеих технологий сравнимы;

- показатели ударной вязкости сварного соединения, коэффициенты вязкости  $K_v$  и деформостойкости  $D_2$  более высокие при автоматической сварке.

О высоком уровне вязкости сварных соединений обоих вариантов говорят и исследования поверхностей изломов швов, ЗТВ и линии сплавления, на которых практически нет хрупких участков. Таким образом механизированная сварка проволокой ЭК-56 под флюсом АНК-70 при бесспорных своих преимуществах обеспечивает комплекс свойств сварных соединений НЛВП сталей не ниже, чем в исходном варианте сварки электродами ЭА-395/9.

Разработанная технология была согласована институтами ЛенНИИхиммаш и ВНИИПТХимнефтеаппаратуры и утверждена Минхимнефтемашем для применения при изготовлении продукции, подведомственной Госгортехнадзору.

Разработанная технология была успешно внедрена на Гумском машиностроительном НПО им. М.В.Фрунзе при изготовлении конструкций из сталей АК-25 и АК-27. Как вариант такой технологии внедрена двухдуговая сварка типа "Тандем". Режимы сварки табл.5 применяются для первой дуги. Вторая проволока, отстоящая от первой на расстоянии 12...20 мм, плавится под действием переменного тока:  $I_d=500...600A$ ,  $U_d=36...38V$ . Использование разработанной технологии позволило увеличить в 5 раз производительность труда, на 20% снизить расход дорогостоящих сварочных материалов,

значительно сократить цикл изготовления изделий, улучшить санитарно-гигиенические условия труда сварщиков.

Результаты исследований настоящей работы позволили также разработать технологию плакировки трубных решеток из стали АК-27 для приварки к ним труб из стали 12Х18Н10Т. Такая технология внедрена в СМПО им. М.В.Фрунзе, причем ленточные электроды для наплавки первого слоя выбираются в зависимости от температуры эксплуатации изделия.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. Установлена прямая взаимосвязь между хладостойкостью зоны сплавления разнородных сталей и шириной мартенситной прослойки, образующейся в этой зоне. Показано, что главным фактором регулирования мартенситной прослойки является содержание никеля в металле шва. В результате исследований получена зависимость "критического" (минимально допустимого) уровня легирования аустенитного шва никелем от температуры эксплуатации сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей в диапазоне температур 203...153К.

2. Развито представление о механизме влияния металлургических и технологических факторов на мартенситную прослойку, образующуюся в переходном слое зоны сплавления разнородных сталей. Показано, что влияние никеля проявляется главным образом за счет увеличения скорости и времени прохождения диффузионных процессов между сварочной ванной и жидко-твердой областью основного металла на границе сплавления.

3. Изучено влияние раздельного и комплексного легирования W, Ti, Mo и Mn однофазного шва типа Х25Н25 на его технологическую прочность. Показана эффективность комплексного легирования молибденом и марганцем и установлены оптимальные содержания их в металле шва: 4...6% Mo и 4...7% Mn.

4. В результате исследований влияния компонентов шихты керамического флюса на однофазный аустенитный шов показана эффективность фтористого бария, гематита, алюмомагниевого порошка и феррохромбора. Оптимальное соотношение этих компонентов в шихте флюса АНФ-6 обеспечивает повышение стойкости аустенитного шва против горячих трещин в 1,6 раза и прочностных характеристик наплавленного металла на 25%.

5. На основании выполненных исследований разработаны сварочные материалы: проволока марки ЭК-56 (св-06Х20Н25М6Г8) и флюс марки АНК-70, а также технология сварки сталей АК-25 и АК-27, обеспечивающие высокую

технологическую прочность металла шва и хладостойкость сварных соединений при температуре эксплуатации 163К.

6. Решена научная задача замены ручной сварки аустенитными электродами на механизированную сварку под флюсом низколегированных высокопрочных сталей. Разработанная технология внедрена на Сумском НПО им. Фрунзе при изготовлении крупногабаритных колонных и теплообменных аппаратов линий низкотемпературного разделения углеводородов природного газа. Использование разработанной технологии позволило увеличить в пять раз производительность труда, на 20% снизить расход дорогостоящих сварочных материалов, значительно сократить цикл изготовления изделий и улучшить санитарно-гигиенические условия труда сварщиков.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Сварка под флюсом в конструкциях, работающих до - 110° С (Ю.Н.Готальский, В.С.Базаров, М.А.Лактионов) /Автоматическая сварка. 1984 -N10. С 15...17.

2. Особенности сварочных флюсов, содержащих оксиды железа (Ю.Н.Готальский, М.А.Лактионов и др.) /Автоматическая сварка. -1987. - N8. -с52-54.

3. Выбор материала переходного слоя двухслойной аустенитной наплавки трубных решеток из перлитной стали повышенной прочности для работы при 173К (М.А.Лактионов, А.Н.Брискман) /Сварочное производство. -1991.- N8. -С 11...14.

4. Технология механизированной сварки аустенитной проволокой низколегированных сталей (М.А.Лактионов) /Химическое и нефтяное машиностроение. -1993. -N11 -С38...40.

5. А.С. N1826351 А1 ГКИ В 23/362. Керамический флюс для сварки низколегированных высокопрочных сталей. Кушнерев Д.М., Лактионов М.А. и др. - Зарегистрирован 13.10.92 г.

6. Положительное решение от 4.01.92 г. по заявке N4927665/27 - 10674 с приоритетом от 5.04.91 г. Керамический флюс для сварки аустенитной проволокой. Кушнерев Д.М., Устинов С.Д., Лактионов М.А. и др. - Не опубл.

#### **Личный вклад автора.**

В (1, 2) исследованы закономерности влияния металлургических факторов на склонность аустенитного наплавленного металла к горячим трещинам, в (3) установлена прямая взаимосвязь между уровнем легирования аустенитного шва никелем и хладостойкостью сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей, в (4) исследовано комплексное влияние технологических и металлургических факторов на хладостойкость и технологическую прочность

сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей, выполненных аустенитным швом.

#### Аннотация.

Ключевые слова: низколегированные высокопрочные стали (НЛВП стали), хладостойкость, технологическая прочность.

Установлены закономерности влияния технологических и металлургических факторов на структуру и свойства сварных соединений НЛВП сталей, выполненных аустенитным швом. Получена прямая зависимость уровня легирования аустенитного шва никелем от температуры эксплуатации сварных соединений НЛВП сталей в диапазоне 203...163 К. Показана эффективность комплексного легирования аустенитного шва Мо и Мп и установлены оптимальные содержания их в наплавленном металле. Установлено соотношение компонентов шихты керамического флюса, обеспечивающее значительный рост прочностных характеристик аустенитных швов. На основании выполненных исследований разработаны сварочные материалы: проволока ЭК-56 (Св-06Х20Н25М6Г8) и флюс марки АНК-70, а также технология сварки сталей АК-25 и АК-27, обеспечивающие требуемый комплекс свойств сварных соединений.

#### Summary.

Main words: low -allow high-strength steels (NLVP), cold resistance, technological strength.

There were found regularities of technological and metallurgical factors influence on a structure and properties of NLVP steels, which were fulfilled by austenitic weld. We have got straight dependence of alloying austenitic weld level by nickel from temperature of NLVP weld joints operation in the range of T 203...163 K. It is shown the effectiveness of combined Mo and Mn alloying of austenitic weld and the optimum content of them in the fused metal. It was found the correlation of ceramic flux charge components which provides considerable increase of austenitic weld seam strength characteristics. On the basis of performed investigation the welding materials were developed: wire ЭК-56 (Weld - 06X20H25M6G8) and flux АНК-70 grade, and also technology of АК-25 and АК-27 steels welding providing the required weld joints properties.



Handwritten text at the top left, possibly a page number or title, appearing as "1000) 2 2A".

Q. 11 - 11 - 11

435723

AB 37.622

**AB 37.622**

---

Зак. 17, т. 120.

21720