

1540680

На правах рукописи

САЖАЕВ Алексей Александрович

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ
ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЗТВ МНОГОСЛОЙНЫХ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ
ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Специальность 05.03.06 - Технология и машины сварочного
производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A. Sazhaev

Москва – 2000

с. 573

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Макаров Э.Л.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Ефименко Л.А.,
кандидат технических наук,
доцент Глазунов С.Н.

Ведущее предприятие - ВНИИСТ.

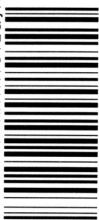
Защита диссертации состоится "28" декабря 2000 г. в 10 часов на
заседании диссертационного совета К 053.15.03 в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э Баумана, 2-ая Бауманская ул., д. 5,
Москва, 105005.

Вам предлагается ознакомиться с диссертацией и при необходимости
по указанию диссертационного совета выслать
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Технического университета имени Н.Э Баумана.

ДИС

Гирш В.И

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1570680

Сажаев Н. Н. Разработка экс

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

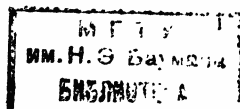
Актуальность проблемы. В настоящее время конструкционные легированные стали (КЛС) широко применяют при производстве ответственных сварных конструкций на предприятиях оборонной промышленности, среднего, общего и энергетического машиностроения. Однако при сварке КЛС возникает ряд проблем, связанных с их повышенной склонностью к образованию холодных трещин (ХТ) и сложностью получения сварных соединений КЛС, равноценных по своим свойствам основному металлу. Обеспечение достаточной свариваемости КЛС является трудной технологической задачей, которая, как правило, решается длительным и дорогостоящим экспериментальным путем

Особенно следует отметить несовершенство способов предотвращения трещин при сварке. Самыми распространенными способами, как и несколько десятилетий назад, остаются предварительный или сопутствующий подогревы, а также последующий отпуск сварных конструкций. При высокой эффективности эти способы нетехнологичны и дорогостоящи. Другое традиционное средство борьбы с ХТ - применение аустенитных электродных материалов, к которым прибегают как к крайнему средству, если подогрев невозможен или неэффективен; при этом приходится мириться с тем, что сварной шов получается значительно менее прочным, чем основной металл. Одновременно становятся дороже сварочные работы за счет высокой стоимости аустенитных материалов.

Ужесточение требований к механическим свойствам сварных соединений КЛС и необходимость перевода указанных отраслей промышленности на ресурсосберегающие технологии обусловили поиск новых, более дешевых и технологичных путей обеспечения достаточной свариваемости КЛС. С этой точки зрения перспективным является использование потенциальных возможностей многослойной сварки и последующей термообработки, обеспечивающих формирование благоприятной структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения.

Представляемая работа посвящена созданию методического и математического обеспечения указанного подхода на базе современных представлений о свариваемости КЛС, влиянии структуры ЗТВ на стойкость сварных соединений КЛС против образования трещин, использовании методов математического моделирования и средств вычислительной техники.

Цель работы. Обеспечение стойкости сварных соединений КЛС против образования холодных трещин и заданного уровня их механических свойств путем формирования благоприятной структуры ЗТВ сварного соединения за счет использования



потенциальных возможностей многослойной сварки и, при необходимости, последующей термической обработки (отпуска).

Методы исследования. Влияние кратковременного отпуска на околошовную зону (ОШЗ) сварного соединения осуществлялось путем имитации тепловых процессов многослойной сварки. Образцы $1,5 \times 10 \times 100$ нагревались на испытательной машине МИС-1М, оборудованной микропроцессорной АСУ. Температура фиксировалась при помощи приваренной к образцу термопары хромель - алюмель диаметром 0,2 мм. Твердость (HV_{10}) измерялась твердомером AVK-A AKASHI типа Виккерс с нагрузкой 10 кг.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с методом наименьших квадратов. Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе NEOPHOTE-30. Разработка технологии сварки неповоротных стыков трубопровода велась с помощью ИПК "Свариваемость", разработанного на кафедре МТ-7 "Технологии сварки и диагностики" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научная новизна работы. Показана возможность применения соотношения Холомена - Джеффа для оценки структурного состояния ОШЗ в условиях сварочного термического цикла (СТЦ) многослойной сварки. Кроме того, разработаны:

- методика оценки структурного состояния ОШЗ сварного соединения при многослойной сварке;
- методический подход и математические модели для расчетной оценки влияния повторных нагревов при многослойной сварке на свойства ОШЗ сварного соединения;
- методический подход и математические модели для расчета свойств ОШЗ сварного соединения после отпуска

Практическая ценность работы заключается в создании программных средств, позволяющих на стадии технологической подготовки производства осуществлять выбор режимов сварки, обеспечивающих стойкость сварных соединений против ХТ и заданный комплекс механических свойств.

Апробация работы. Основные результаты данной работы были рассмотрены на научном семинаре кафедры МТ-7 МГТУ им. Н.Э. Баумана (23.12.1999) и научном семинаре ВНИИСТ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и приложений. Работа выполнена на 128 страницах, содержит 52 рисунка, 14 таблиц и 80 наименований использованных литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность выполненного исследования, а также основные положения, вынесенные на защиту.

Глава 1. Посвящена современным представлениям о свариваемости КЛС и способах ее оценки. Рассмотрены возможные пути обеспечения свариваемости при проектировании технологического процесса (ТП) сварки КЛС

Преимущественно КЛС применяют в тех областях, где основное значение имеет отношение прочности к удельному весу материала, например, при изготовлении изделий спецтехники, летательных аппаратов, магистральных трубопроводов и т.п. Повышенное содержание углерода и легирующих элементов, характерное для КЛС, а также требуемый высокий уровень механических свойств сварных соединений вызывают появление специфических трудностей, связанных с повышенной склонностью КЛС к образованию трещин при сварке. Согласно данным отечественной и зарубежной научно-технической литературы, ХТ составляют свыше 50% всех дефектов, типичных для сварных соединений легированных сталей. В отдельных случаях ХТ становятся препятствием для применения некоторых марок сталей в сварных конструкциях.

Вопросам свариваемости КЛС посвящено большое число работ как отечественных (Прохоров Н.Н., Макара А.М., Шоршоров М.Х., Касаткин Б.С., Петров Г.Л., Макаров Э.Л., Мусияченко В.Ф., Федоров В.Г., Касаткин О.Г. и другие), так и зарубежных ученых (Гранжон Х., Гривняк И., Велков К., Зайффарт П., Ито Ю., Коттрелл П., Сузуки Х. и другие), и в настоящее время в этой области накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал.

Основными факторами, определяющими образование ХТ, являются: структурное состояние металла сварного соединения, характеризующее наличием составляющих мартенситного и бейнитного типа, а также размером действительного аустенитного зерна, концентрация диффузионного водорода в зоне зарождения очага трещины, уровень растягивающих сварочных напряжений.

Существенные резервы обеспечения свариваемости КЛС скрыты в правильном выборе теплового режима сварки. Перспективным в этом смысле является подбор таких режимов при многослойной сварке, которые обеспечили бы предотвращение образования или распад закалочных структур за счет повторного нагрева ЗТВ предыдущих слоев. Однако отсутствие научно обоснованной методики выбора режимов сварки требует проведения большой

предварительной работы (сварки технологических проб и опытных изделий).

Наряду с экспериментальными методами в практике исследований свариваемости используют экспериментально-расчетные методы определения показателей свариваемости. Наиболее перспективной представляется оценка на основе анализа физических процессов в металле при сварке на базе фундаментальных законов механики, металлофизики, тепло- и массопереноса, концептуальных физических моделей с использованием базы экспериментальных данных и т.п. Такие расчеты позволяют получить большой объем полезной информации, универсальны и гибки, а применение компьютерной техники существенно ускоряет проведение исследовательских работ.

Разработанный в МГТУ им. Н.Э.Баумана программный комплекс ИПК "Свариваемость", реализующий данный подход на базе предложенной Э.Л.Макаровым концептуальной модели образования ХТ, позволяет проводить многовариантные расчеты для определения условий, исключая образование ХТ в стыковых сварных соединениях закаливающих сталей. В результате расчета определяют структурный состав и комплекс механических свойств ЗТВ, размер действительного аустенитного зерна околосварной зоны (ОШЗ), концентрацию диффузионного водорода в ОШЗ, уровень сварочных напряжений и уровни соответствующих критических факторов трещинообразования. Оценка стойкости производится путем сопоставления действительных и критических факторов трещинообразования.

Расчет структуры основан на теоретическом анализе процессов распада твердых растворов, что не позволяет достаточно полно учесть влияние химсостава некоторых материалов. Для совершенствования комплекса требуется экспериментальная проверка результатов расчета с корректировкой используемых моделей.

На основании проведенного анализа были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Разработать экспериментально-расчетную методику для оценки структурного состояния ОШЗ сварного соединения в процессе многослойной сварки.
2. Выявить закономерности влияния частичного и полного отпуска ОШЗ в процессе многослойной сварки и последующей термической обработки на его механические свойства.
3. На основе экспериментальных данных разработать математические модели и программное обеспечение для оценки структурного состояния ОШЗ многослойного сварного соединения.

4. На основе полученных моделей разработать рекомендации по тепловому режиму многослойной сварки применительно к условиям изготовления северного морского подводного трубопровода.

Глава 2. Посвящена разработке методики исследования влияния повторных нагревов на структурное состояние сварных соединений.

Для решения задач, поставленных в работе, было необходимо рассмотреть возможные термические влияния на ОШЗ, имеющие место в процессе многослойной сварки и последующей термообработке (в дальнейшем под термообработкой понимается послесварочный отпуск).

В процессе многослойной сварки ОШЗ каждого валика подвергается нескольким (в зависимости от расположения валика), кратковременным (с максимальной продолжительностью не более нескольких минут) термическим воздействиям. В результате этого воздействия процессы отпуска не успевают пройти до конца и, следовательно, в данном случае можно говорить только о частичном отпуске. Для оценки степени завершенности отпуска необходимо рассматривать суммарное тепловое воздействие на ОШЗ.

При использовании после многослойной сварки отпуска необходимо рассматривать совместное влияние термических воздействий, как в результате наложения последующих слоев, так и дальнейшего длительного нагрева при отпуске. Степень влияния отпуска на ОШЗ в этом случае будет зависеть от соотношения максимальной температуры $T_{\max}$, достигнутой в исследуемой точке в процессе сварки последующих валиков и температуры $T_{\text{отп}}$ последующего отпуска. Если $T_{\max} \gg T_{\text{отп}}$, то влияние последующего отпуска на структуру ОШЗ не будет существенным.

В процессе многослойной сварки по сравнению с отпуском существенным является продолжительность теплового воздействия, поэтому целесообразно рассматривать эти влияния, как две самостоятельные задачи.

Ввиду того, что реальный термический цикл при многослойной сварке сложен, для проведения исследования был использован приведенный цикл, состоящий из двух нагревов: высокотемпературного ($T_{\max} > A_{c3}$) и низкотемпературного ($T_{\max} < A_{c1}$), причем последний представлял собой однократный нагрев при постоянной температуре в течение определенного времени. Так же было принято, что частичный отпуск в процессе многослойной сварки в исследуемой точке ОШЗ во время повторных нагревов происходит при температуре, не превышающей A_{c1} .

В основу решения задачи адаптации реального СТЦ многослойной сварки к выбранной схеме было положено предположение о возможности использования соотношения Холомена - Джеффа (Х.-Д.) для описания процессов структурообразования при частичном отпуске в ОШЗ сварного соединения в процессе многослойной сварки.

Параметр Холомена - Джефа используют для оценки совместного влияния температуры нагрева и времени выдержки на релаксацию напряжений при отпуске. Он основан на предположении о том, что одно и то же состояние при отпуске можно достичь при различных температурах, используя соответствующее время выдержки:

$$H_p = T * (K + \lg(t)) * 10^{-3}, \quad (1)$$

где H_p - параметр Холомена - Джеффа,

T - температура термообработки, °С.

t - время отпуска, ч.

K - коэффициент приведения. Для случая релаксации напряжений $K = 20$.

Задача по адаптации реального СТЦ многослойной сварки к выбранной схеме решалась следующим образом: весь исследуемый участок термического цикла с многократными повторными нагревами разбивался на временные интервалы t_i , продолжительность которых была обратнопропорциональна изменению температуры $|\Delta T_{\text{нагр}}|$ нагрева. Принималось, что в интервале t_i температура является постоянной и ее значение составляет среднее арифметическое температур на границах t_i . За базовый выбирался интервал с наибольшим $T_{\text{нагр}}$ (T_{max} , t_{max}). Все оставшиеся интервалы приводились по температуре к T_{max} , а соответствующая этой температуре их продолжительность рассчитывалась с помощью соотношения Х.-Д., исходя из эквивалентности термического воздействия:

$$T_i (K' + \lg t_i) = T_{\text{max}} (K' + \lg t_i'), \text{ откуда} \\ t_i' = 10^{((T_i / T_{\text{max}}) * (K' + \lg t_i) - K')} \quad (3)$$

где t_i - реальная продолжительность i -го интервала при T_i , с.

t_i' - приведенная к T_{max} продолжительность i -го интервала, с.

T_{max} - температура интервала с максимальной темп-рой повторного нагрева ($< A_{c1}$), °С.

T_i - реальная температура i -го интервала, °С.

K' - коэффициент приведения для условий кратковременного отпуска.

Приведенная продолжительность нагрева всего исследуемого участка СТС многослойной сварки рассчитывалась следующим образом:

$$t_{\Sigma} = t_{\max} + \sum_{i=1}^{N-1} t_i' \quad (4)$$

где t_{Σ} - приведенная продолжительность нагрева, с.

$t_{\max}$ - продолжительность интервала с максимальной температурой нагрева, с.

t_i' - приведенная продолжительность i -го интервала, с.

N - количество интервалов за исключением интервала с максимальной темп-рой $T_{\max}$.

При выборе критерия оценки структурного состояния ЗТВ сварного соединения необходимо было выполнить следующие условия: во-первых, он должен быть информативен, во-вторых - прост в измерении. Исходя из вышеперечисленных условий за критерий оценки структурного состояния была принята твердость (HV), так как для ее измерения не требуется изготовления специальных образцов, а так же на ее основе возможно оценить другие механические свойства металла в исследуемой точке. Следует отметить, что в технологической документации оценка и контроль структуры регламентируются по значениям твердости.

Для проведения исследования влияния полного отпуска на ОШЗ необходимо определить значащие факторы. С точки зрения кинетики процессов отпуска основное влияние оказывает температура $T_{\text{нагр}}$ нагрева и содержание в стали углерода и карбидообразующих элементов. Такими элементами являются (в порядке возрастания степени карбидообразования): Mn, Cr, Mo, W, Nb, V, Zr, Ti.

В настоящее время при производстве КЛС стараются избегать применения таких элементов, как Nb и Zr, а элементы W и Ti применяют достаточно редко. Следовательно, с точки зрения практической ценности исследования рассмотрение сталей, содержащих эти химические элементы, нецелесообразно. Поэтому рассматривалось содержание следующих химических элементов в стали: C, Mn, Cr, Mo, V.

Граничные условия для проведения эксперимента по химсоставу выбирались, исходя из пределов содержания выше указанных элементов в КЛС: C=0.1...0.4, Mn=0.2...2.0, Cr=0.2...2.0, Mo=0...1.0, V=0...1.0, % Граничные условия по температуре $T_{\text{нагр}}$ отпуска выбирались исходя из реально применяемых на производстве и составляли 300...700 °C.

При исследовании влияния частичного отпуска в процессе многопроходной сварки на ОШЗ еще учитывался и такой параметр, как время t_{Σ} пребывания исследуемой точки при температуре свыше 300°C. Граничные условия по этому параметру выбирались исходя из анализа реальных сварочных термических циклов и составляли 0...90 с.

Эксперимент заключался в испытании имитационных образцов. Для испытаний использовался образец в виде тонкой металлической пластины размерами 1,5×10×100. Для локализации нагрева в центре образца с двух сторон выполнялся специальный вырез размерами 2×20. Это позволило увеличить скорость нагрева и уменьшить коробление образца. Эксперимент выполнялся на испытательной машине МИС-1М. Для охлаждения образцов была разработана и изготовлена соответствующая оснастка, состоящая из резервуара, в котором находилась вода под давлением 1,5...2 атм., и системы подачи со специальным распылителем. Образец подвергался нагреву проходящим током до температуры 1200°C с последующим свободным охлаждением до 900°C и принудительным дальнейшим охлаждением водо-воздушной смесью. Этим достигались высокие скорости охлаждения в интервале температур 500...800°C (более 100°C/с), что обеспечивало образование структуры с содержанием мартенсита около 95%. После охлаждения образцы подвергались вторичному нагреву до $T_{\text{нагр}}$, имитирующему нагрев ОШЗ при наложении последующих слоев. Интервалы изменения температур и времени повторного нагрева соответствовали граничным условиям эксперимента. Шаг изменения по температуре повторного нагрева составлял 100°C, а продолжительность выдержки была 0, 30, 50 и 90 с.

Далее производились механическая обработка, заключавшаяся в шлифовании и полировке образцов, и замер твердости на твердомере AVK-A AKASHI типа Виккерс с регламентированной точностью ± 3%.

Результаты испытаний применительно к стали 12ХГН2МФ.

Твердость после закалки: 429 HV					
Продолжительность выдержки, с	Температура нагрева, °C				
	300	400	500	600	700
0	405,2	386	364	360,8	348,1
30	400	382	362,4	359,2	344,2
50	392	380	359	356	343,2
90	386	374,2	357	354,2	342,1

Подобные экспериментальные результаты так же были получены для следующих сталей: 10Г2, 10ГНЗМ, 21Г, 25ХГС, 30ХГМФ, 30ХГНЗМ

Глава 3. Посвящена разработке математических моделей частичного и полного отпуска ОШЗ и программного обеспечения.

Для получения моделей частичного отпуска применялась статистическая обработка экспериментальных данных, в результате которой была получена следующая зависимость.

$$HV=245,73+EXP(5,16+2,917*C+0,334*Cr+0,083*(Mo+V)-0,00216*T-0,00145*t). \quad (5)$$

Параметры модели: $R=0,92$; $S=25$.

Для определения коэффициента K' в соотношении X-Д. (2) для условий кратковременного отпуска был проведен анализ экспериментальных данных. На полученных экспериментальных кривых для определенной марки стали выбирались точки с одинаковой твердостью. Согласно принятой гипотезе, значение параметра X-Д. в этих точках равны и можно записать следующее равенство:

$$T_1*(K'+lg(t_1+10))=T_2*(K'+lg(t_2+10))=T_3*(K'+lg(t_3+10))=T_4*(K'+lg(t_4+10))=... \text{ и т.д.}$$

После преобразований было получено следующее выражение, позволяющее определить коэффициент K' :

$$K'=(T_1/T_2*lg(t_1+10)-lg(t_2+10))/(1-T_1/T_2). \quad (6)$$

Значения коэффициента K' были определены для сталей 12ХГН2МФ и 30ХГНЗМ. Полученные данные были использованы для построения регрессионных моделей:

$$\begin{aligned} \text{для стали 12ХГН2МФ: } K'_1 = & -0,362*t_1+0,0083*t_1^2-0,085*t_2-0,0019*t_1*t_2-0,0006*t_2^2- \\ & 0,175*T_1+0,003*t_1*T_1+0,00052*t_2*T_1+0,000858*T_1^2+0,233*T_2-0,0034*t_1*T_2-0,00017*t_2*T_2- \\ & 0,001936*T_1*T_2+0,001027*T_2^2, R=0,89, S=3,2; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{для стали 30ХГНЗМ: } K'_2 = & -0,17*t_1+0,0029*t_1^2+0,01*t_2-0,00076*t_1*t_2+0,0001*t_2^2- \\ & 0,046*T_1+0,0032*t_1*T_1-0,0012*t_2*T_1+0,001364*T_1^2+0,067*T_2-0,0038*t_1*T_2+0,00149*t_2*T_2- \\ & 0,003153*T_1*T_2+0,001796*T_2^2, R=0,89, S=2,9; \end{aligned} \quad (8)$$

где: t_1, t_2 – продолжительность 1-го и 2-го интервалов соответственно, с;

T_1, T_2 – температура нагрева для 1-го и 2-го интервалов соответственно, °С.

При расчете произвольно выбранной стали K' , в первом приближении можно оценить путем линейной интерполяции

$$K'_i = K'_1 + (K'_2 - K'_1) \frac{C_{\Sigma 0} - C_{\Sigma 01}}{C_{\Sigma 02} - C_{\Sigma 01}}, \quad (9)$$

где: K'_1 – коэффициент K' для произвольно выбранной стали;

K'_1 – коэффициент K' для стали 12ХГН2МФ,

K'_2 – коэффициент K' для стали 30ХГН3М,

$C_{э01}$ – эквивалент углерода стали 12ХГН2МФ,

$C_{э02}$ – эквивалент углерода стали 30ХГН3М;

$C_{э0}'$ – эквивалент углерода произвольной стали.

$C_{э0}$ – эквивалентное содержание углерода, характеризующее влияние химических элементов в стали на длительность процесса отпуска при заданной температуре. Численное значение $C_{э0}$ было получено путем анализа полученных экспериментальных данных, а также результатов исследований, опубликованных в литературных источниках:

$$C_{э0} = C + 0,085 * Mn + 0,07 * Cr + 0,06 * Mo + 0,11 * V, \% \quad (10)$$

Для построения модели полного отпуска ОШЗ была проведена обработка экспериментальных данных, опубликованных в литературе, с использованием методов математической статистики. В качестве экспериментальных данных были использованы результаты исследований сталей, прошедших обработку по режиму Закалка в воду + Отпуск. Данные подбирались в соответствии с граничными условиями по химсоставу и температуре отпуска. $C=0,1 \dots 0,4$, $Mn=0,2 \dots 2,0$, $Cr=0,2 \dots 2,0$, $Mo=0 \dots 1,0$, $V=0 \dots 1,0$, %; $T_{\text{отп}}=300 \dots 700$ °C.

Режим Закалка в воду + Отпуск можно рассматривать как имитацию процессов, протекающих в ОШЗ в процессе отпуска сварного соединения. При таком жестком режиме закалки образуется около 95% мартенсита. После закалки стали подвергались полному отпуску в печи с различными температурами выдержки.

Для получения зависимости был использован план, за основу которого был принят близкий к D-оптимальному план Хартли. Этот план является симметричным, что соответствует принятой гипотезе о равнозначности влияющих факторов. Выбор марок сталей и температур отпуска выполнялся в соответствии с требованиями этого плана.

В результате статистической обработки была получена следующая зависимость:

$$\begin{aligned} HV = & 1269,52 * C - 1962,38 * C^2 - 284,78 * Mn + 21128,35 * C * Mn + 156,36 * Mn^2 - 47,82 * Cr - \\ & 405,387 * C * Cr - 357,17 * Mn * Cr + 501,48 * Cr^2 + 464,32 * Mo + 200,41 * C * Mo - 545,55 * Mn * Mo + \\ & 59,34 * Mo^2 + 1898,57 * V + 107,67 * C * V + 698,78 * Mn * V - 2737,032 * Cr * V - 2126,86 * Mo * V + \\ & 346,35 * V^2 + 0,77 * T - 0,4747 * C * T - 0,28240 * Cr * T + 0,3875 * V * T - 0,000967 * T^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Параметры модели: $R=0,95$; $S=23$.

Для расчета твердости HV в ОШЗ сварного соединения при многослойной сварке

была разработана компьютерная программа "Автоотпуск", в основу которой были положены полученные в работе экспериментальные данные и математические модели.

Алгоритм данной программы включает в себя следующие части:

1. Ввод исходных данных (химсостав, СТЦ многослойной сварки).
2. Предварительная обработка исходных данных (определение возможности проведения расчета по введенным исходным данным).
3. Расчет параметров приведенного термического цикла.
4. Расчет твердости HV в заданной точке ОШЗ многослойного сварного соединения.

Для расчета необходимо ввести химсостав стали и данные по термическому циклу. Исходные данные по СТЦ должны быть представлены в электронном виде (файл данных), получаемого либо с помощью оцифровки реального СТЦ многослойной сварки, либо с помощью компьютерного моделирования.

Далее определяются время начала отпуска t_n , время конца отпуска t_k , максимальная температура повторного нагрева T_{max} в диапазоне $t_n \dots t_k$. Под временем начала отпуска t_n подразумевается начало интервала, в котором температура повторных нагревов $T_{нагр}$ не превышает Ac_1 вплоть до завершения СТЦ. Под временем конца отпуска t_k подразумевается начало интервала, в котором температура повторных нагревов $T_{нагр}$ не превышает 300°C вплоть до завершения СТЦ.

Если исходные данные соответствуют условиям задачи (т.е. существуют повторные нагревы, соответствующие параметрам интервала $t_n \dots t_k$), то осуществляется переход к определению параметров приведенного термического цикла и расчета HV в исследуемой точке.

Для проверки полученных моделей был проведен эксперимент на реальных сварных соединениях опытных образцов. Выполнялось многослойное сварное соединение пластин в щелевую разделку автоматической сваркой в среде защитных газов (CO_2).

Было выполнено два соединения: для пластин из стали марки 10Г2 толщиной 14 мм и из стали марки 10ХГН толщиной 32 мм соответственно. Заполнение разделки выполнялось по режимам, применяемым для сварки неповоротных стыков трубопроводов.

Для определения воздействия каждого последующего валика на ЗТВ первого валика выполнялось ступенчатое заполнение разделки, т.е. каждый последующий валик был короче предыдущего на 50 мм.

После сварки первого валика на обратной стороне пластины по центру шва приваривалась термопара, что позволило записать реальные термические циклы и рассчитать термический цикл в исследуемой точке.

После завершения сварки из соединения вырезались поперечные темплеты. Для уменьшения термического влияния при механической обработке поперечная резка темплет проводилась с помощью электроэрозионной обработки. Далее проводилось измерение твердости по линии на расстоянии 2мм от низа пластины, что позволило оценить термическое влияние каждого последующего валика на ОШЗ первого валика.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало достаточно высокую сходимость результатов.

Твердость HV в исследуемой точке ОШЗ.

Материал - 10Г2	Толщина пластины -14мм.		
Твердость HV основного металла	228		
Расстояние от линии сплавления, мм	0,3	0,6	
После сварки 1-го валика (эксперимент)	382,4	294,1	
После сварки 2-го валика	Эксперимент	336,5	276,7
	Расчет	343,4	273,1
После сварки 3-го валика	Эксперимент	328,7	273,7
	Расчет	338,2	271

Глава 4. Посвящена разработке технологии многослойной сварки неповоротных стыков подводного морского трубопровода из КП-стали 10Г2МФБ.

Для обеспечения транспортировки газа от северных месторождений, расположенных на полуострове Ямал, необходимо строительство трубопроводов, так как применение другие средства транспорта не представляется возможным, либо их использование представляется экономически нецелесообразным. В результате технико-экономического и экологического анализа при проектировании газотранспортной системы Ямал - Европа была показана целесообразность сооружения многониточного 60-километрового подводного трубопровода через Байдарашскую губу.

Для строительства этого трубопровода была выбрана сталь 10Г2МФБ, поставляемая в состоянии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. (КП-сталь). Чтобы применить ИПК "Свариваемость" для разработки технологии сварки, было необходимо получить поправочные коэффициенты, учитывающие такое исходное состояние поставки.

Для получения поправочных коэффициентов было проведено сравнительное исследование по оценке роста первичного аустенитного зерна стали, подвергнутой нормализации, и стали, полученной КП-методом. Для исследования применялись такие

же образцы, как и в эксперименте по влиянию многократного кратковременного отпуска. Образцы изготавливались из сталей, имеющих идентичный химсостав, что было необходимо для точности результатов, но различное исходное состояние.

Эксперимент заключался в нагреве образцов проходящим током до $T=1200^{\circ}\text{C}$ с последующей выдержкой при этой температуре в течение 5 и 10с и последующим свободным охлаждением на воздухе. Впоследствии образцы подвергались полировке и травлению на первичное аустенитное зерно. На основании полученных данных были определены численные значения требуемых коэффициентов.

Ввиду того, что разрабатываемая технология сварки неповоротных стыков трубопровода, изготовленного из КП сталей, должна быть приемлема для использования на уже разработанном технологическом оборудовании, применяемом на трубоукладочном судне, за основу была взята технология, используемая для сварки труб из нормализованной стали. По этой технологии сварка выполняется в шелевую разделку, причем 1-й корневой валик выполняется на малых погонных энергиях, а 2-й корневой валик по схеме "горячий проход" на больших скоростях сварки. Такая схема формирования корня соединения позволяет уменьшить его напряженно-деформированное состояние, а, следовательно, и вероятность образования ХТ. Остальные, заполняющие валики, выполняются на одних и тех же режимах. Исключение составляет 1-й заполняющий валик, который ввиду конструктивных особенностей применяемого оборудования выполняется с такой же скоростью сварки как и 2-й корневой валик.

Расчет на ИПК "Свариваемость" по режимам сварки, применяемых для нормализованных сталей, показал, что при совместном воздействии всех негативных факторов (высокие скорости охлаждения из-за низкой температуры окружающей среды, повышенное содержание диффузионного водорода в металле шва из-за большой влажности (до $8 \text{ см}^3/100\text{г}$), высокая жесткость конструкции т.д.) и при отсутствии подогрева существует возможность образования ХТ в ОШЗ 1-го и 2-го валиков сварного соединения. Анализ показал, что структура в корне шва не является благоприятной (82% - нижний бейнит, 10% - верхний бейнит, 8% - феррит - перлит, твердость - 380 HV). Основной причиной формирования такой структуры явилось большое расстояние между головками для выполнения внутреннего (1-го) и внешнего (2-го) корневого валиков (около 640 мм), что было обусловлено выбранным технологическим оборудованием.

Повторный расчет показал, что для устранения возможности образования ХТ

необходимо использовать предварительный подогрев 110°C. Однако это решение не представлялось оптимальным. Поэтому было проведено исследование возможности использования другого технологического оборудования и режимов сварки для выполнения корня данного сварного соединения – 4-х головок для сварки внутреннего шва вместо 6-ти, а так же использование одинаковой скорости сварки для 1-го и 2-го валиков. Расчет показал, что это не удлинит продолжительность общего цикла сборки - сварки, так как новая продолжительность цикла на первом посту не превышает время выполнения работ на постах сварки заполняющих слоев, а изменение скорости сварки не увеличит общего количества валиков. Такой шаг позволил синхронизировать выполнение внутреннего и внешнего корневого валика, а так же расчетным путем подобрать оптимальное расстояние между головками для выполнения корневых и 1-го заполняющего валиков. Все это позволило обеспечить формирование благоприятной структуры в ОШЗ в корневой части соединения (4% -нижний бейнит, 74% -верхний бейнит, 22% -феррито - перлит, твердость – 230 HV)

После проведенных изменений данное соединение было просчитано еще раз. Расчет показал, что для предотвращения образования ХТ наряду с сохранением требуемых механических свойств шва и ОШЗ для предложенной технологии будет достаточно применение предварительного подогрева для 1-го валика с температурой 60°C, что соответствует температуре нагрева стыка при выполнении просушки соединения перед сваркой.

Так же была проведена оценка возможности образования ХТ в случае возникновения нестандартных ситуации. Под нестандартными ситуациями подразумевалась остановка процесса сварки в случае отказа сварочного или вспомогательного оборудования. Расчет показал, что в этом случае есть возможность образования холодных трещин в ОШЗ 5-го и 7-го валиков. Однако применение непосредственно после остановки сварки до ее возобновления послесварочного нагрева с температурой 50°C полностью исключает образование ХТ в ОШЗ сварного соединения.

Для проверки полученных расчетных данных было проведено испытание реальных многослойных соединений из КП-стали 10Г2МФБ жесткой пробы ГОСТ26388-84. Сварка выполнялась с помощью сварочного трактора АДСФ-1000 с закрепленной на консоле головкой сварочного полуавтомата 'ESAB LAW-510'. Предварительный подогрев выполнялся газовой горелкой. Контроль температуры осуществлялся по меткам, нанесенным термическим карандашом. После сварки и травления раствором азотной кислоты проба была

разломана. ХТ обнаружено не было.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Одним из перспективных направлений по обеспечению стойкости сварных соединений конструкционных легированных сталей против ХТ является применение многослойной сварки, при которой развиваются процессы отпуска за счет тепловложения при выполнении последующих слоев. Поэтому актуально создание методики выбора рациональных режимов сварки и последующей термообработки (отпуска), исключающих образование ХТ в многослойных стыковых сварных соединениях конструкционных легированных сталей.
2. Разработана методика получения обобщенного СТЦ применительно к многослойной сварке, которая позволяет оценить влияние многократных повторных нагревов на структуру и свойства ОШЗ сварного соединения. В основу методики положено предположение, что протекание процессов отпуска в условиях СТЦ многослойной сварки может быть описано соотношением типа Холомена - Джеффа, применяющегося для расчета процесса релаксации напряжений.
3. Разработана методика эксперимента по моделированию термического воздействия на ОШЗ в процессе многослойной сварки, в которой для имитации сварочного термического цикла используется нагрев проходящим током и регулирование скорости охлаждения за счет применения охлаждения водо-воздушной смесью.
4. Разработаны математические модели для расчета твердости HV ОШЗ сварного соединения в процессе многослойной сварки, а так же после полного отпуска.
5. Разработана компьютерная программа "Автоотпуск", позволяющая определять параметры обобщенного СТЦ и производить расчет твердости HV в заданной точке ОШЗ многослойного сварного соединения.
6. С помощью эксперимента по оценке роста первичного аустенитного зерна определен поправочный коэффициент к минимальному разрушающему напряжению для расчета сопротивляемости КП-сталей к образованию ХТ с использованием ИПК Свариваемость. Численное значение коэффициента составило 1,23 по сравнению с нормализованной сталью.
7. Разработаны рекомендации по сварке стали 10Г2МФБ (поставляемой в состоянии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением) для изготовления подводного

морского трубопровода для перехода через Байдарашскую губу газотранспортной системы Ямал - Европа. Учет изменения структурного состояния стали в процессе многослойной сварки, подбор и соответствующая настройка сварочного оборудования, а также подбор режимов сварки позволил снизить температуру предварительного подогрева с 110°C до 60°C, что соответствует температуре просушки стыка, при обеспечении стойкости сварного соединения против образования ХТ.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Сажаев А.А., Макаров Э.Л. Оценка влияния температуры послесварочного отпуска на механические свойства металла сварных соединений // Производство и надежность сварных конструкций: Материалы научно-технической конференции стран СНГ. – Калининград, 1993. – С. 14.
2. Сажаев А.А., Макаров Э.Л. Повышение надежности работы сварных соединений низколегированных сталей путем послесварочного нагрева // Материалы международного конгресса и выставки "Защита-95". – Москва, 1995. – С. 202.
3. Сажаев А.А., Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Расчетный метод оценки структуры ЗТВ многослойного сварного соединения // Современные проблемы сварочной науки и техники: Материалы российской научно-технической конференции "Сварка-97". – Воронеж, 1997. – С. 5-6.

Режим сварки неповоротных стыков трубопровода, полученный с помощью расчетного анализа на ИПК "Свариваемость"

Проход	Напряжение, В	Ток, А	Скорость сварки, м/ч
1	22	200	45
2	25	260	45
3	25	260	45
4...7	25	260	23
8,9	22	230	23

Диаметр сварочной проволоки - 0,9мм

Защитный газ: 1-й и 2-й проход - 70% CO₂/ 30% Ar, остальные - CO₂.

Расход защитных газов - 27-32 л/мин

Вылет проволоки - 6-14мм

2-ой слой выполняется по схеме "горячий проход"

Применяется предварительный подогрев стыка: $T_{\text{подогрев}} = 60^{\circ}\text{C}$

АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ "АВТООТПУСК"

