

1547262

На правах рукописи

КОНОВАЛОВ Алексей Викторович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПЕРЛИТНЫХ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

05.03.06 - Технология и машины сварочного
производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

А.Коновалов

Москва - 1995

207104

81.33.13
621.7
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 СУДНИК В.А.

кандидат технических наук,
с.и.с. ЧАБУРКИН В.Ф.

Ведущее предприятие - ЦНИИТМАШ

Защита состоит
ционного совета К.
ческого университет
107005, Москва, 2-

Ваш отзыв
просим выслать по

С диссертаци
имени Н.Э.Баумана

Автореферат

УЧЕНЫЙ С
ДИССЕРТАЦИОН
К.053
К.Т.Н.

1547262

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

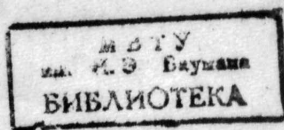
Особенно следует отметить несовершенство способов предотвращения трещин при сварке. Самыми распространенными способами, как и несколько десятилетий назад, остаются предварительный или сопутствующий подогревы, а также последующий отпуск сварных конструкций. При высокой эффективности эти способы весьма 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 ВПС и необходимость перевода указанных отраслей промышленности на ресурсосберегающие технологии обусловили поиск новых, более дешевых и технологичных путей обеспечения достаточной свариваемости ВПС. С этой точки зрения весьма перспективным представляется использование низколегированных присадочных материалов, обеспечивающих получение высокопрочного металла шва бейнитно-мартенситной структуры.

Представляемая работа посвящена разработке методического и математического обеспечения указанного подхода на базе современных представлений о свариваемости ВПС, влиянии состава металла шва на стойкость сварных соединений ВПС против образования трещин, использовании методов математического моделирования, оптимизации и средств вычислительной техники.

Цель работы. Обеспечение стойкости против образования холодных трещин и заданного уровня механических свойств сварных соединений ВПС за счет выбора оптимального сочетания сварочных материалов и параметров режима сварки.



Методы исследования. Расчетные методы включали в себя численное интегрирование нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных разностей, вычислительные методы оптимизации, методы теории подобия и моделирования, методы регрессионного анализа, методы проектирования программных систем.

Экспериментальный метод состоял в записи сварочных термических циклов, измерении твердости и испытании лабораторных образцов на износостойкость.

Научная новизна работы связана с совершенствованием расчетных методов и современного подхода к выбору сварочных материалов и режимов сварки для обеспечения заданных показателей свариваемости высокопрочных сталей.

1. Установлено, что для моделирования тепловых процессов в околосварной зоне (ОШЗ) сварных соединений высокопрочных сталей возможно использование аналитических решений Н.Н.Рыкалина, но с учетом распределенности источника тепла и скрытых теплот фазовых превращений;

2. Разработаны методический подход и математические модели, позволяющие рассчитывать размеры зоны проплавления и долю участия основного металла в шве при сварке стыковых соединений пластин ограниченной толщины;

3. Разработан методический подход и математические модели для расчетной оценки влияния состава металла шва на сопротивляемость ОШЗ образованию ХТ с учетом различий температур ликвидус, солидус, γ - α превращений основного металла и металла шва;

4. Разработана методика оптимизации состава сварочных материалов и параметров режима сварки по комплексу показателей качества сварного соединения.

Практическая ценность работы заключается в создании программных средств, позволяющих на стадии технологической подготовки производства осуществлять выбор сварочных материалов и режима сварки, обеспечивающих стойкость сварных соединений против ХТ и заданный комплекс механических свойств. Использование программы позволило, в частности, разработать состав шихты керамического флюса для наплавки износостойкого слоя заданной твердости на сталь 45.

Апробация работы. Основные результаты данной работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Прочность и диагностика сварных конструкций" (Тверь, 1991), научно-технической конференции стран СНГ "Производство и надежность сварных конструкций" (Москва, 1993), международной научно-технической конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники"

(Ростов н/Д, 1993), а также были рассмотрены и одобрены на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1992г.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 29 рисунков, 22 таблицы и 90 наименований 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 ВПС и способах ее оценки. Рассмотрены возможные пути обеспечения свариваемости при проектировании технологического процесса (ТП) сварки ВПС.

ВПС с пределом прочности до 2200 МПа применяются преимущественно в тех областях, где основное значение имеет отношение прочности к удельному весу материала, например, при изготовлении летательных аппаратов, изделий спецтехники и т.п. Повышенное содержание углерода и легирующих элементов, характерное для ВПС, а также требуемый высокий уровень механических свойств сварных соединений вызывают появление специфических трудностей, связанных с повышенной склонностью ВПС к образованию трещин при сварке.

По данным, опубликованным в отечественной и зарубежной научно-технической печати, 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 ВПС посвящено большое число работ как отечественных (Макара А.М., Прохоров Н.Н., 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 (Велков К., Гранжон Х., Гривняк И., 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 и уровень растягивающих сварочных напряжений.

Существенные резервы обеспечения свариваемости ВПС скрыты в правильном выборе теплового режима сварки и состава металла шва.

Весьма перспективными в этом смысле являются сварочные материалы, обеспечивающие получение высокопрочного металла шва бейнитно-мартенситной структуры. Однако отсутствие научно обоснованной методики выбора сварочных материалов требует проведения большой предварительной работы (пробных сварок и испытаний).

Наряду с экспериментальными методами в практике исследований свариваемости используются расчетно-экспериментальные методы определения показателей свариваемости. Наиболее перспективной представляется оценка на основе анализа физических процессов в металле при сварке на базе фундаментальных законов механики, металлوفизики, тепло- и массопереноса, концептуальных физических моделей и т.п. Такие расчеты дают чрезвычайно большой объем полезной информации, универсальны и гибки, а применение ЭВМ позволяет существенно ускорить исследовательские работы.

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

К недостаткам комплекса следует отнести упрощенный подход к определению размеров и химического состава шва, что не позволяет надежно оценивать его стойкость против образования ХТ. Кроме того, отсутствие методики учета влияния состава металла шва на сопротивляемость ОШЗ образованию ХТ, связанного с различием температур ликвидус, солидус, γ - α превращений основного металла и металла шва, не позволяет эффективно использовать комплекс для выбора оптимальных сочетаний параметров режима сварки и сварочных материалов.

На основании проведенного анализа были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Провести анализ влияния теплофизических свойств металла шва и геометрических параметров сварного соединения на тепловую обстановку в ЗТВ;
2. Разработать методику расчета размеров зоны проплавления и доли участия основного металла в шве при сварке пластин ограниченной толщины;

3. Разработать методику расчетной оценки степени влияния металла шва на сопротивляемость ОШЗ образованию ХТ;

4. Разработать экономную математическую модель комплексного анализа технологического варианта сварки ВПС, пригодную для использования в оптимизационных задачах;

5. Разработать методику решения задачи синтеза химического состава сварочных материалов и основных технологических параметров процесса сварки ВПС на базе математической модели комплексного анализа;

6. Реализовать методику в виде компьютерной программы для использования в инженерной практике.

Глава 2. Посвящена разработке математической модели комплексного анализа технологического процесса сварки ВПС.

Системный анализ ТП сварки ВПС на основе современных представлений о взаимосвязи показателей качества сварных соединений ВПС с физическими процессами, протекающими в металле при сварке показал, что при имитационном моделировании процесса сварки ВПС решению тепловой задачи должно быть уделено особое внимание, т.к. от его точности зависят результаты решения всех подчиненных задач. Необходимо правильно рассчитывать размеры зоны проплавления (особенно при сварке пластин ограниченной толщины, когда проявляется влияние нижних поверхностей) и далее - химический состав металла шва.

Для исследования влияния теплофизических свойств металла шва и геометрических параметров соединения на тепловую обстановку в ЗТВ была разработана компьютерная программа численного решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных разностей.

Модель сварного соединения была дискретизирована в виде тепломеханических элементов (центров элементов) и теплопроводящих стержней (границ элементов). В основу физической модели был заложен закон сохранения энергии и закон теплопроводности Фурье.

В качестве граничных условий использовались условия I-го и III-го рода. Ввод теплоты осуществлялся через металл сварочной ванны и нормально-круговой подвижный поверхностный источник (в соответствии с типовым тепловым балансом при дуговой сварке). Перемешивание металла сварочной ванны учитывалось заданием на порядок более высокой теплопроводности жидкого металла по сравнению с твердым.

Был выполнен цикл расчетов по определению основных параметров СТЦ в характерной точке ОШЗ ($T_{\max}=1350^{\circ}\text{C}$) при фиксированных параметрах режима сварки. В качестве металла шва рассматривались три характерных материала различных структурных классов - стали

08, 30ХГСА и 12Х18Н9Т, теплофизические свойства которых брались усредненными в 15-ти температурных интервалах. Скрытая теплота плавления учитывалась в интервале температур солидус-ликвидус методом фиктивной теплоемкости.

Проведенные расчеты показали, что различие теплофизических свойств металла шва сказывается лишь на высокотемпературной части СТЦ ОШЗ ($T > 1000^\circ\text{C}$). Наибольшее влияние на степень перегрева ОШЗ оказывают значения температур ликвидус и солидус металла шва, что связано с дополнительным тепловым воздействием на ОШЗ вследствие выделения скрытой теплоты плавления металла шва на фронте кристаллизации. На переднем фронте сварочной ванны, наоборот, происходит поглощение скрытой теплоты плавления основным металлом, что приводит к уменьшению размера зоны проплавления.

Скорости охлаждения ОШЗ в температурном интервале распада аустенита практически совпали как в случае аустенитного металла шва (12Х18Н9Т), так и в случае ферритного металла шва. Кроме того, проведенный анализ показал, что термические циклы в ОШЗ сварных соединений исследуемых сталей, рассчитанные с учетом температурной зависимости теплофизических свойств и без такого учета, имеют незначительные отличия; в то время как геометрия разделки кромок пластин ограниченной толщины и тепловой эффект фазового превращения оказывают заметное влияние на форму и размеры сварного шва и высокотемпературную часть СТЦ околосшовной зоны. Указанные обстоятельства свидетельствуют о возможности корректного использования аналитических решений Н.Н. Рыкалина для моделирования СТЦ в ОШЗ сварных соединений пластин ограниченной толщины при условии обязательного учета влияния теплового эффекта фазового превращения и геометрии разделки кромок.

Формально эти условия могут быть обеспечены выбором соответствующего распределения источника тепла, причем критерием соответствия может служить близость или совпадение очертаний зон проплавления, полученных расчетным и экспериментальным путем. Опираясь на гипотезу о взаимно независимом влиянии на форму проплавления распределенности источника и толщины свариваемых пластин, методику расчета размеров зоны проплавления при сварке пластин ограниченной толщины можно представить в виде последовательного решения трех задач:

1. Прямая задача - определение очертания зоны проплавления при наплавке валика в канавку на поверхности массивного тела (форма канавки соответствует разделке кромок свариваемых пластин). На этом этапе целесообразно использовать эмпирические зависимости, связывающие основные размеры сварного шва с параметрами режима сварки и геометрией разделки кромок.

2. Обратная задача - определение неизвестных параметров распределения источника тепла, обеспечивающего с заданной точностью очертания зоны проплавления, полученной при решении задачи 1. На этом этапе важно выбрать такой закон распределения источника тепла, чтобы минимизировать трудоемкость последующих вычислений, т.е. по возможности использовать суперпозицию известных аналитических решений от некоторой комбинации сосредоточенных источников с учетом поглощения скрытой теплоты плавления на переднем фронте сварочной ванны.

3. Прямая задача - определение размеров зоны проплавления пластин ограниченной толщины с использованием распределенного источника тепла, полученного при решении задачи 2. На этом этапе проявляется влияние ограниченности толщины пластин на увеличение глубины проплавления за счет близости адиабатической границы (нижней поверхности пластин) к зоне действия источника тепла.

В качестве модели источника тепла предлагается использовать комбинацию из трех источников, действующих в плоском слое, один из которых расположен на оси симметрии соединения, два других равной мощности расположены симметрично. Температура в любой точке определяется по формуле:

$$T = T_0 + \frac{k \cdot Q}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^3 A_i \sum_{j=1}^3 \frac{1}{R_{ij}} \exp\left[-\frac{V_{св}}{2a} (R_{ij} + x)\right] \quad (1)$$

где k - коэффициент, учитывающий наличие разделки кромок;

A_i - весовые коэффициенты мощности источников.

Поглощение части мощности источника тепла на переднем фронте сварочной ванны, связанное с тепловым эффектом фазового превращения, было учтено введением соответствующего стока тепла, мощность которого определяется по формуле:

$$Q' = -\rho \cdot V_{св} \cdot F_{пр} \cdot L_{пл} \quad (2)$$

где ρ - плотность основного металла;

$F_{пр}$ - площадь проплавления основного металла;

$L_{пл}$ - скрытая теплота плавления основного металла.

Для получения представительного набора результатов был спланирован и выполнен масштабный вычислительный эксперимент (ВЭ) по определению неизвестных параметров источников (более 3000 вариантов) при варьировании параметров разделки кромок и режима сварки в диапазоне реально осуществимых на практике ($T_0 = 20 \dots 300^\circ\text{C}$, $Q/V = 8 \dots 60$ кДж/см, $d_z = 1.2 \dots 5$ мм) и обеспечивающих коэффициент формы провара $\psi = 0.8 \dots 4$. Каждый вариант включал в себя решение прямой и обратной задачи.

Анализ результатов проведенного ВЭ позволил установить связь безразмерных координат точечных источников с коэффициентом

формы провара: при $\psi > 2$ источники действуют на поверхности плоского слоя, при $\psi = 2$ источники группируются в один точечный, при $\psi < 2$ источники выстраиваются в вертикальную линию. Статистической обработкой результатов ВЗ были построены соответствующие регрессионные модели.

Экспериментальная проверка на образцах с записью термического цикла подтвердила высокую точность разработанных моделей. Возможность уточненного расчета хим. состава металла шва позволила перейти к расчетной оценке степени его влияния на сопротивляемость сварных соединений ВПС образованию ХТ.

Оценка такого влияния может быть выполнена путем сопоставления показателей сопротивляемости исследуемого материала с аналогичными показателями для некоторого эталонного материала, поведение которого в условиях сварки хорошо изучено. Ввиду того, что исследуемые ВПС принадлежат к одному структурному классу мартенситно-бейнитных сталей, а определяющее влияние на образование ХТ в них оказывает углерод, в качестве эталонных материалов выбраны стали 14ХНЗМА (для низкоуглеродистых ВПС) и 30ХГСА (для среднеуглеродистых ВПС). Кроме того, для обеспечения единой базы сравнения, в качестве эталонных выбраны сварочные проволоки Св-08А и Св-18ХМА.

Сопоставление производится по показателю сопротивляемости образованию ХТ - минимальному разрушающему напряжению при испытаниях на замедленное разрушение. Этот показатель рассчитывается для заданных условий сварки (доля участия основного металла, исходный водород в шве) по моделям для двух сочетаний материалов: пробные сварочные материалы + эталонный основной металл (ЗОМ) и эталонные сварочные материалы + ЗОМ. Отношение этих двух показателей K_σ является косвенной оценкой степени положительного ($K_\sigma > 1$) или отрицательного (при $K_\sigma < 1$) влияния пробных сварочных материалов на показатель сопротивляемости исследуемой стали.

Расчет сопротивляемости ОШЗ образованию ХТ производится далее по формуле:

$$\sigma_{кр} = K_\sigma \cdot \sigma'_{кр} \quad (3)$$

где $\sigma_{кр}$ - сопротивляемость ОШЗ образованию ХТ, МПа;

K_σ - степень влияния металла шва;

$\sigma'_{кр}$ - сопротивляемость основного металла в условиях имитированного СТЦ ОШЗ, МПа

Представленные результаты исследований были использованы при разработке компьютерной программы комплексного анализа ТП сварки ВПС на основе методического подхода, реализованного в ИПК "Свариваемость". Анализ одного варианта на СМ-4 занимает 5 се-

кунд, что позволяет использовать разработанную модель ТП сварки ВПС при решении задач оптимизации.

Глава 3. Посвящена разработке компьютерной программы оптимизации состава сварочных материалов и режима сварки ВПС на базе математической модели комплексного анализа процесса.

Для получения качественного сварного соединения ВПС необходимо, чтобы удовлетворялись следующие требования:

- 1) предотвращалось образование трещин в шве и ЗТВ;
- 2) достигался заданный комплекс механических свойств сварного соединения.

Проблема оптимизации имеет два важнейших аспекта, первый из которых заключается в формулировке критерия оптимальности. Утверждение "объект оптимален" всегда требует дополнения - с какой точки зрения, по какому критерию.

Второй аспект заключается в выборе методов и алгоритмов решения задач оптимизации, наиболее эффективных и надежных для принятой математической постановки задачи.

Анализ разработанной математической модели ТП сварки ВПС позволяет выделить ее специфические особенности:

Во-первых, объект проектирования характеризуется значительным числом выходных параметров, к которым предъявляются условия работоспособности.

Во-вторых, помимо того, что выходные параметры имеют различный физический смысл, они являются противоречивыми, т.е. улучшение одного показателя (например, повышение прочности) приводит к ухудшению другого (снижению пластичности).

В третьих, область поиска проектных решений определяется как прямыми ограничениями на входные параметры, так и функциональными (отсутствие ХТ, требуемая геометрия шва). Следовательно, при выборе метода решения необходимо ориентироваться на методы условной оптимизации с ограничениями.

Для оценки степени выполнения каждого из условий работоспособности целесообразно использовать безразмерные величины, учитывающие разброс выходных параметров объекта:

$$Z_j = a_j \left| \frac{TT_j - y_j}{\delta_j} - 1 \right| \quad (4)$$

где Z_j - запас работоспособности по выходному параметру y_j ;

a_j - вспомогательный коэффициент.

TT_j - нормативное значение выходного параметра y_j ;

y_j - текущее значение j -го выходного параметра;

δ_j - величина, характеризующая разброс параметра y_j .

Тогда целевой функцией может являться минимальная из оценок Z_j (функция минимума). Максимизация минимальной из оценок Z_j повышает вероятность выполнения того из условий работоспособности, которое характеризуется в данный момент наименьшей вероятностью выполнения (максиминный критерий).

Таким образом, сформулирована математическая постановка задачи проектирования ТП сварки ВПС: для объекта, описываемого математической моделью $Y=M(X)$ определить такой вектор входных параметров X^* , лежащий в области допустимых решений XD , чтобы во-первых, достичь максимума целевой функции минимального запаса работоспособности и, во-вторых, обеспечить в δ -окрестности точки X^* , определяемой возможными возмущениями по входным параметрам, устойчивое по выходным параметрам состояние объекта:

$$F(X^*) = \max_{x \in XD} \min_{j=\{1:m\}} Z_j \quad (5)$$

$$F(X^*+\delta X) = \min_{j=\{1:m\}} Z_j > 0 \quad (6)$$

Имея в виду противоречивость выходных параметров модели, можно сделать вывод о неизбежности возникновения гребневой ситуации (в результате пересечения гиперповерхностей откликов запасов работоспособности) в процессе решения задачи. Поэтому для решения оптимизационной задачи был выбран эффективный метод поиска - метод проекции вектора градиента. При его использовании траектория поиска проходит вдоль вершины гребня, чем обеспечивается существенно более быстрое продвижение к цели, чем при применении градиентных методов или методов прямого поиска.

Совершенно очевидна невозможность учета в компьютерной программе всех нюансов при принятии того или иного проектного решения. Поэтому наибольшей гибкостью обладают интерактивные программные средства, позволяющие использовать опыт специалиста при анализе промежуточных результатов и принятии решений. Алгоритм такой процедуры применительно к наиболее сложному случаю - разработке ТП сварки ВПС под слоем флюса - представлен на рис.1.

Оптимизация компонентов вектора режима сварки проводится на базе детерминированной модели комплексного анализа ТП сварки ВПС. В качестве сварочных материалов в расчетах используются типовые материалы, выбираемые в зависимости от состава основного металла в соответствии с рекомендациями или на основании опыта проектировщика.

По результатам решения задачи оптимизации режима принимается решение о дальнейших действиях: переход к оптимизации состава сварочных материалов или, в случае неудовлетворительного решения, коррекция исходных данных (см.рис.1).

Выбор сварочных материалов производится в зависимости от требований, предъявляемых к комплексу механических свойств металла шва. Сначала предпринимается попытка подбора стандартных сварочных материалов (проволоки, флюса) из имеющегося банка данных. В процессе подбора для каждой пары проволока-флюс проводится расчет химического состава металла шва, определяется комплекс механических свойств металла шва, его сопротивляемость образованию ХТ и степень влияния на аналогичный показатель ОШЗ.

Критерием сравнения "К" является алгоритмическая свертка вектора оценок в виде функции минимума. Компонентами S_j вектора оценок являются:

- запасы работоспособности по каждому из механических свойств металла шва;
- функциональное условие стойкости металла шва против образования ХТ в шве ($\sigma_{св} < \sigma_{кр. шва}$);
- функциональное условие стойкости ОШЗ против образования ХТ с учетом влияния металла шва ($\sigma_{св} < K_{\sigma} \cdot \sigma'_{кр}$).

По результатам подбора стандартной пары материалов принимается решение о дальнейших действиях. Если для лучшей пары материалов критерий сравнения оказывается положительным, то выбор признается удачным. В противном случае можно предпринять попытку синтезировать требуемый состав сварочной проволоки, флюса или пары проволока-флюс. Речь идет о разработке ТЗ на изготовление новых сварочных материалов.

При синтезе состава сварочного флюса (Φ^*) следует задать марку стандартной сварочной проволоки, которую предполагается использовать в паре с разрабатываемым флюсом, и задать пределы содержания компонентов флюса (ФД). Далее в максиминной постановке решается оптимизационная задача относительно содержания компонентов плавленного флюса:

$$K(\Phi^*) = \max_{\Phi \in \Phi Д} \min_{j=1:m} S_j \quad (7)$$

При синтезе состава сварочной проволоки следует выбрать стандартный плавленный флюс, предполагаемый для использования в паре с разрабатываемой проволокой и задать ее предполагаемую систему легирования:

1. C - Si - Mn
2. C - Si - Mn - Cr
3. C - Si - Mn - Cr - Ni
4. C - Si - Mn - Cr - Ni - Mo
5. Сложнолегированная проволока (17 легирующих элементов).

При выборе простой системы легирования содержание других легирующих элементов принимается на уровне их обычного металлургического минимума в стали.

Синтез состава сварочной проволоки также осуществляется путем решения оптимизационной задачи:

$$K(P^*) = \max_{P \in PD} \min_{j \in [1:m]} S_j \quad (8)$$

Кроме прямых ограничений, определяемых принятыми пределами легирования проволоки (ПД), область поиска ограничивается допустимыми пределами легирования металла шва, определяющими применимость моделей, описывающих свойства металла шва. Данное ограничение учитывается путем введения в вектор оценок штрафной функции, значение которой формируется в зависимости от ожидаемого состава металла шва.

Количество попыток синтеза состава проволоки зависит от выбранной системы легирования. Результат поиска отождествляется с результатом той попытки, которая привела к максимальному значению критерия "K". Если простая система легирования проволоки не обеспечивает приемлемого решения, следует использовать более сложную систему легирования.

После достижения решения необходимо проверить, насколько оно осуществимо на практике, когда на процесс сварки действуют различного рода возмущения. Используются два способа проверки: методом наихудшего случая и статистический анализ по методу Монте-Карло. Первый предусматривает анализ работоспособности объекта при наиболее неблагоприятном сочетании параметров, вызванном действием возмущений:

$$\Delta X_i = -(\max \delta X_i) \cdot \text{sign} \frac{dF(X)}{dX_i} \Big|_{X=X^*} \quad (9)$$

$$F(X + \delta X) = \min S_j > 0 \quad (10)$$

Выполнение условия (10) означает устойчивость решения при любом сочетании неблагоприятных факторов. Если же это условие не выполняется, то необходимо определять вероятность выполнения условий работоспособности по методу Монте-Карло.

Программа реализована для СМ ЭВМ на алгоритмическом языке FORTRAN-IV в виде отдельного исполняемого модуля. Проведенные тестовые расчеты показали, что наиболее трудоемкой частью расчетов является оптимизация теплового режима сварки - на поиск решения требуется 18-20 минут работы СМ-4.

Решение второй оптимизационной задачи - выбор состава сварочных материалов - является менее трудоемкой. В среднем процедура расчета оптимального состава сварочной проволоки занимает 2-3 минуты на СМ-4, что сопоставимо с временем ввода исходных данных, необходимых для такого расчета.

Глава 4. Посвящена разработке состава шихты магнитного керамического флюса для наплавки износостойкого слоя.

Коленчатый вал (к/в) автомобиля ЗИЛ-130 изготовлен из стали 45 и имеет закаленные ТВЧ на твердость HRC 52...54 поверхности коренных и шатунных шеек. В связи с дефицитом запасных частей на АРЕМЗ г.Краснодара внедрен способ восстановления к/в методом широкопослойной дуговой наплавки с использованием магнитного флюса (наплавка "бесконечным" покрытым электродом). В качестве флюса на АРЕМЗ используется механическая смесь порошкообразных материалов следующего состава:

Графит литейный ГЛ-1	6-10%	Плавиковый шпат ФФС-97А	7 %
Порошок алюминия ПА-1	3%	Мрамор электродный М97П	2 %
Ферротитан ФТи30А	5%	Порошок железа ПЖВ-2	остальное

Опыт эксплуатации опытной установки показал, что с увеличением твердости наплавленного слоя выше HRC 46...48 (за счет возрастания доли графита в смеси) в нем образуются как горячие (вдоль направления наплавки), так и холодные (поперечные) трещины. Поэтому лаборатория "Свариваемость материалов" МГТУ совместно с лабораторией восстановительных технологий НИИАТ участвовала в разработке состава наплавочных материалов и оптимальных параметров технологии наплавки, обеспечивающих стойкость против образования трещин и твердость наплавленного слоя HRC 52...54 в состоянии после наплавки.

Для уменьшения деформаций изделия за счет минимального тепловложения в процессе наплавки было проведено исследование возможности разработанного в НИИАТ источника ИПНС-315 по обеспечению стабильного процесса наплавки на малых токах.

После определения рабочих диапазонов изменения параметров режима наплавки были выбраны их значения, обеспечивающие приемлемое формирование наплавленного слоя (отсутствие несплавлений, натеков) толщиной 2.5 - 3 мм.

Расчет требуемого состава шихты флюса производился с помощью компьютерной программы, описанной в главе 3, с использованием математических моделей, описывающих металлургические процессы при сварке покрытым электродом, т.е. решалась задача оптимизации состава электродного покрытия. Выбор РДС в качестве аналога процесса наплавки объясняется сходством условий протекания металлургических реакций в дуге и ванне. За основу при выборе оптимального состава шихты флюса был выбран керамический флюс ЖСН-1 по ВТУ-МЧМ УССР-74.

С учетом возможности образования ГТ в наплавленном слое в расчет было введено дополнительное ограничение ($HCS < 1.8$) на его химический состав. Проведенные расчеты показали, что легирование наплавленного металла марганцем целесообразно производить

через проволоку, так как использование в составе шихты доменного ферромарганца, содержащего значительное количество фосфора, приводит к увеличению потенциальной склонности наплавленного металла к образованию ГТ. Было принято решение об использовании проволоки Св-08ГА и Св-08Г2С.

Оптимальным признан следующий состав шихты:

Феррохром ФХ800А	10%	Мрамор электродный М97П	8 %
Ферротитан ФТи30А	5%	Плавиковый шпат ФФС-97А	5 %
Силикокальций СК-20	5%	Порошок железа ПЖВ-2	остальное

Использование представленного состава шихты в сочетании с проволокой Св-08ГА позволяет получать наплавленный слой, стойкий к образованию трещин и обладающий требуемой твердостью. Проведенные испытания наплавленных образцов на машине трения показали повышение износостойкости наплавленного к/в ЗИЛ-130 более чем в 4 раза по сравнению с валами, восстановленными по штатным технологиям АРЕМЗ и ИЭС им. Е.О.Патона. На разработанный состав шихты получено положительное решение о выдаче патента России (гос.рег. N 5024094).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Переход на перлитные присадочные материалы при сварке ВПС, вызванный необходимостью снижения стоимости сварочных работ, связан со значительными трудностями по обеспечению стойкости сварных соединений против образования ХТ. Эта проблема может быть решена за счет правильного выбора сварочных материалов и режима сварки. Поэтому необходимо создание методики выбора оптимальных сварочных материалов и режима сварки, обеспечивающих необходимый уровень качества сварных соединений ВПС.

2. На основе численного анализа тепловых процессов в ОШЗ стыковых сварных соединений показано, что

а) учет температурной зависимости теплофизических свойств низколегированных сталей не оказывает существенного влияния на тепловую обстановку в ОШЗ, поэтому для моделирования тепловых процессов в ОШЗ сварных соединений возможно использование аналитических решений Н.Н.Рыкалина, но с учетом распределенности источника тепла и скрытых теплот фазовых превращений;

б) различия температур ликвидус и солидус металла шва оказывают влияние лишь на высокотемпературную часть термического цикла ОШЗ, что связано с выделением теплоты кристаллизации в различные моменты времени.

3. Разработаны:

а) математические модели, позволяющая моделировать высоко-

температурные процессы в ОШЗ стыковых сварных соединений;

б) методический подход к расчетному определению формы провара при сварке пластин ограниченной толщины, опирающийся на гипотезу о независимом влиянии распределенности источника и толщины пластины на глубину проплавления;

в) методический подход к расчетной оценке влияния состава металла шва на сопротивляемость ОШЗ образованию ХТ с учетом различий температур ликвидус, солидус, γ - α превращений основного металла и металла шва;

г) методика выбора оптимальных сочетаний сварочных материалов и режима сварки, обеспечивающих получение стыковых соединений с заданным комплексом механических свойств.

4. Разработаны компьютерные программы:

а) анализа тепловых процессов на базе решения нелинейной тепловой задачи методом конечных разностей;

б) программа оптимизации в максиминной постановке, реализующая методы наискорейшего спуска и проекции градиента;

в) программа комплексного анализа технологического процесса сварки высокопрочных сталей, являющаяся дальнейшим развитием программного комплекса "Свариваемость";

г) программа, реализующая методику выбора сварочных материалов и режимов сварки, предназначенная для использования на стадии технологической подготовки производства.

5. Разработан состав шихты керамического флюса для наплавки износостойкого слоя на сталь 45. На разработанный состав шихты получено положительное решение о выдаче патента России (гос.рег. N 5024094).

Основное содержание работы отражено в публикациях:

1. Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Выбор перлитных сварочных материалов и режима дуговой сварки по комплексу требуемых свойств сварных соединений высокопрочных сталей // Прочность и диагностика сварных конструкций: Тез.докл. Всесоюз. науч.-техн. конф., 18-21 ноября 1991г., г.Тверь.- М., 1991.- С. 60-61.

2. Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Назначение сварочных материалов и режима сварки высокопрочных сталей с помощью компьютера // Производство и надежность сварных конструкций: Тез.докл. науч.-техн. конф. стран СНГ, 26 - 28 января 1993 г., Москва-Калининград МО.- М., 1993.- С. 97.

3. Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Оптимизация процесса дуговой сварки высокопрочных сталей с помощью компьютера // Современные проблемы сварочной науки и техники: Тез.докл. Междунар. науч.-техн. конф.-Ростов н/Д., 1993.- С. 11-12.

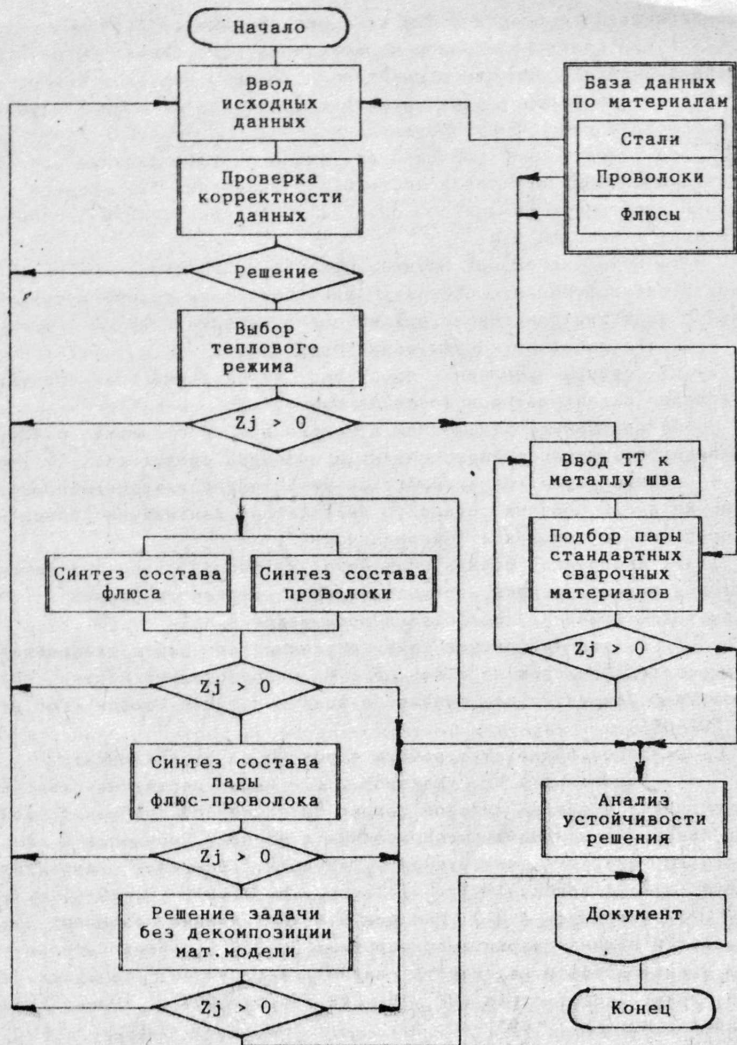


Рис. 1 Алгоритм разработки ТП сварки ВПС под слоем флюса