

НА ДЕМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

Коновалов Алексей Викторович

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПУТЕЙ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВАРИВАЕМОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ
ПРИ МНОГОСЛОЙНОЙ СВАРКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

05.03.06 - Технологии и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва 2005 г.



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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

доктор технических наук, профессор
ЕФИМЕНКО Л.А.

доктор технических наук, в.н.с.
КИСЕЛЕВ А.С.

Ведущее предприятие - ВНИИДЖТ МПС РФ

Защита состоится 07 апреля 2005г. на заседании диссертационного совета Д.212.141.01 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Желающие присутствовать на защите диссертации должны заблаговременно известить совет письмами заинтересованных организаций на имя председателя совета.

Телефон для справок 267-09-63

Автореферат разослан " 1 " марта 2005 г.

И.О. ученого секретаря
диссертационного совета
Д.212.141.01
д.т.н., профессор



Неровный В.М.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1715931

Коновалов А.В. Разработка

Подписано к печати 18.01.2005 Объем 2,0 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ 48

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В настоящее время низколегированные стали (НЛС) широко применяются взамен углеродистых, обеспечивая снижение металлоемкости на 20-50% за счет более высоких механических свойств. Они широко используются в строительстве трубопроводов, конструкций газо- и нефтехимических производств, судов, мостов и других ответственных сооружений и сварных конструкций.

Наряду с традиционным комплексом механических свойств важнейшим показателем стали, предназначенной для изготовления сварных конструкций, является свариваемость – возможность образовывать при установленной технологии сварки соединения, отвечающее предъявляемым к нему требованиям.

Обеспечение достаточной свариваемости НЛС является трудной технологической задачей, которая, как правило, решается длительным и дорогостоящим экспериментальным путем. Наиболее частым и опасным проявлением недостаточной свариваемости НЛС являются холодные трещины (ХТ) – локальные хрупкие межкристаллические разрушения металла сварных соединений, претерпевшего полную или частичную закалку. Значительные трудности вызывает обеспечение заданного комплекса механических и эксплуатационных свойств различных зон сварного соединения.

Традиционные меры предупреждения ХТ в сварных соединениях сводятся к назначению предварительного или сопутствующего подогрева, последующему отпуску сварных конструкций, либо использованию сварочных материалов аустенитного класса. При своей эффективности эти меры нетехнологичны и весьма дорогостоящи. Рекомендации справочников по назначению температур подогрева при сварке не учитывают всех нюансов технологии, и, как правило, являются завышенными. В большинстве случаев существует принципиальная возможность достижения положительного результата при использовании значительно более дешевых технологических решений и сварочных материалов перлитного класса.

Накопленный опыт свидетельствует, что значительные резервы обеспечения свариваемости НЛС скрыты в правильном выборе теплового режима сварки и состава металла шва. Однако значительные потенциальные возможности многослойной сварки по управлению процессами формирования структуры и свойств сварного соединения, регулированию уровня временных и остаточных напряжений, используются далеко не в полной мере. Принятие принципиальных решений относительно режимов и последовательности укладки швов, выбора сварочных материалов, назначении подогрева и т.п. осуществляется на основе личного опыта разработчиков и результатах многочисленных экспериментов; сами решения, как правило, не являются оптимальными. Недостаточно широко при проектировании технологий сварки используются прогрессивные методы исследований на основе компьютерного

ИИИ И. Э. БАУМАН
93А

моделирования. Наконец, сам процесс разработки технологии многослойной дуговой сварки изделий из НЛС остается весьма трудоемким и длительным.

Перечисленные недостатки в значительной мере объясняются сложностью и большим числом взаимосвязанных процессов, протекающих в сталях при многослойной сварке, их влиянием на комплекс показателей качества сварного изделия, неоднозначной зависимостью показателей качества от параметров технологии сварки. Совершенно очевидно, что только использование технических возможностей современной компьютерной техники для комплексного анализа технологических вариантов сварки путем моделирования совокупности протекающих в металле процессов, позволит получать оптимальные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки.

Представленная работа посвящена разработке методического и математического обеспечения указанного подхода на базе современных представлений о свариваемости НЛС, влиянии физических процессов, протекающих в НЛС при сварке, на формирование показателей свариваемости, использовании методов математического моделирования, оптимизации и средств вычислительной техники. Она является итогом 16-летней деятельности (1988-2004) автора в лаборатории «Свариваемость материалов» МГТУ им.Н.Э.Баумана. В этот период возможности проведения экспериментальных исследований были весьма ограничены, в связи с чем усилия автора были в основном направлены на систематизацию и осмысление обширных экспериментальных данных, а основным средством исследований стало компьютерное моделирование с верификацией моделей по результатам экспериментов.

Следует отметить, что в последние десятилетия развитие программных средств моделирования сварочных процессов привело к становлению новой области знаний, посвященной компьютерным технологиям в сварке. Актуальность развития данного направления подтверждается не только введением специализации 12.05.10 «Компьютерные технологии в сварочном производстве» в учебные планы ведущих технических университетов России, но и большим числом регулярных специализированных международных научных конференций, посвященных этой проблеме: «Математические методы в сварке» (Киев, ИЭС им.Е.О.Патона), «Компьютерные технологии в соединении материалов» (Тула, ТулГУ), «Numerical Analysis of Weldability» (Graz, TUG), «Computer Technology in Welding» (TWI) и др.

Цель работы.

Обеспечение свариваемости конструкционных низколегированных сталей и снижение трудоемкости проектирования технологических процессов многослойной дуговой сварки за счет компьютерной оптимизации параметров технологии.

Задачи работы.

1. Провести анализ существующих подходов к математическому описанию физических процессов, протекающих в низколегированных сталях при сварке и термической обработке для выявления моделей, пригодных для имитационного моделирования многослойной сварки;

2. Разработать комплексную математическую модель формирования показателей свариваемости низколегированных конструкционных сталей на основе современных представлений об их взаимосвязи с параметрами технологии и физическими процессами, протекающими в металле при многослойной сварке;

3. Реализовать разработанные модели в виде компьютерных программ, пригодных для анализа свариваемости низколегированных сталей в условиях многослойной сварки на базе ИПК «Свариваемость легированных сталей» (инженерная версия) и программного комплекса «СВАРКА» (исследовательская версия);

4. Сформулировать математическую постановку задачи проектирования технологического процесса многослойной сварки и определить критерии оптимальности;

5. Разработать методику решения задачи синтеза оптимальных значений основных технологических параметров процесса многослойной сварки на базе математической модели комплексного анализа;

6. Разработать программное обеспечение для реализации методики синтеза оптимальных технологических параметров процесса многослойной сварки и состава сварочных материалов.

Методы исследований.

Расчетные методы включали в себя методы системного анализа, численное интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений на основе методов конечных разностей и конечных элементов, вычислительные методы оптимизации, методы теории подобия, методы планирования эксперимента и регрессионного анализа, методы проектирования программных систем.

Экспериментальные методы состояли в записи сварочных термических циклов, проведении дилатометрических испытаний, измерении твердости.

Научная новизна работы.

Элементы научной новизны представляемой диссертационной работы связаны с совершенствованием расчетных методов оценки свариваемости НЛС в условиях многослойной сварки, а также с развитием современного подхода, основанного на методах компьютерного моделирования и оптимизации, к назначению режимов сварки и сварочных материалов для обеспечения заданных показателей свариваемости НЛС.

1. Сформулированы требования к имитационной математической модели формирования показателей свариваемости НЛС при многослойной сварке, заключающиеся в необходимости совместного рассмотрения взаимосвязанных процессов распространения тепла, структурных превращений, диффузии

водорода, изменений свойств и напряженного состояния материала, что позволяет оценить вероятность образования ХТ на любом этапе технологического процесса многослойной сварки.

2. Показано, что анализ кинетики структурных превращений НЛС в условиях термических циклов многослойной сварки может быть проведен путем решения системы уравнений математической физики, описывающих фундаментальные закономерности полиморфных превращений, причем кинетические коэффициенты уравнений превращений могут быть определены из диаграммы анизотермического распада аустенита при сварке путем решения обратной задачи. Справедливость указанного подхода подтверждается воспроизведением дилатометрических кривых и кривых отпуска, а также замерами твердости образцов НЛС, обработанными имитированными СТЦ многослойной сварки.

3. Сформулированы принципы подготовки исходных данных о теплофизических, механических свойствах и дилатометрических характеристиках материалов для имитационного моделирования комплекса физических процессов, протекающих НЛС при сварке, основанные на концепции представления свойств материала соотношением его структурных составляющих и температуры.

4. На основе системного анализа взаимосвязей физических процессов, протекающих в НЛС при сварке, определена стратегия оптимизации параметров технологии сварки НЛС, состоящая из двух этапов. На первом этапе необходимо обеспечить достижение требуемых размеров шва и показателей свариваемости в околошовной зоне сварного соединения за счет выбора параметров режима и подогрева. На втором этапе при фиксированном тепловом режиме сварки необходимо обеспечить требуемые показатели свариваемости металла шва за счет выбора системы и степени легирования сварочной проволоки.

5. Сформулированы требования к термическому циклу многослойной сварки НЛС для обеспечения высоких показателей ударной вязкости и сопротивляемости образованию ХТ. Каждое тепловое воздействие должно оказывать положительное влияние на нижерасположенные слои: сначала перекристаллизацию и измельчение зерна аустенита, и затем - высокий отпуск и релаксацию напряжений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель комплексного анализа технологического процесса сварки и формирования показателей свариваемости низколегированных конструкционных сталей на основе современных представлений об их взаимосвязи с параметрами технологии и физическими процессами, протекающими в металле при многослойной сварке;

2. Подход к моделированию структурных превращений НЛС при многослойной сварке путем решения системы уравнений математической физики, описывающих фундаментальные закономерности полиморфных превращений;

3. Методика определения кинетических параметров структурных превращений по диаграмме анизотермического распада аустенита методом решения обратной задачи;

4. Методический подход к расчету размеров зоны проплавления и доли участия основного металла в шве при сварке деталей ограниченной толщины;

5. Методика решения задач выбора оптимального сочетания химического состава сварочных материалов и параметров режима сварки на базе математической модели комплексного анализа.

Практическая ценность.

Главным практическим результатом диссертационной работы автор считает создание доступных компьютерных средств, позволяющих снизить трудоемкость получения научно обоснованных технологических решений по обеспечению свариваемости изделий из НЛС. Создан ряд компьютерных программ для анализа свариваемости НЛС, в том числе в условиях многослойной сварки (инженерный программный комплекс «Свариваемость легированных сталей»), позволяющих на стадии технологической подготовки производства осуществлять выбор сварочных материалов и режима сварки, обеспечивающих стойкость сварных соединений против ХТ и заданный комплекс механических свойств. Значительно расширены исследовательские возможности программного комплекса «СВАРКА».

Публикации.

По теме диссертации автором опубликовано 34 печатных работы.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на ВНТК "Прочность и диагностика сварных конструкций" (Тверь, 1991), НТК стран СНГ "Производство и надежность сварных конструкций" (Москва, 1993), девяти МНТК: "Современные проблемы сварочной науки и техники" (Ростов н/Д, 1993; Пермь, 1995), «Компьютерные технологии в сварке» (Париж, 1994), «САПР и экспертные системы в сварке» (Тула, 1995), «Численный анализ в свариваемости» (Грац, 1995), «Компьютерные технологии в соединении материалов» (Тула, 1998, 2003), «Машиностроительные технологии» (Москва, 1998), «Сварка на рубеже веков» (Москва, 2003), «МАТИ – Сварка ХХI века» (Москва, 2003), «150 лет Н.Г.Славянову» (Пермь, 2004), а также на научном семинаре кафедры "Технологии сварки и диагностики" МГТУ им.Н.Э.Баумана (1995, 2000, 2005 г.).

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы. Диссертация содержит 411 листов, в том числе 107 рисунков и 55 таблиц. Список литературы состоит из 232 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Глава 1. Современные представления о свариваемости конструкционных низколегированных сталей. Пути обеспечения свариваемости при проектировании технологических процессов сварки.

Свариваемость - свойство металлов или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия. Исходя из данного определения, свариваемость одного и того же материала может быть различно оценена в зависимости от технических требований, предъявляемых к сварной конструкции. Если требования к эксплуатационным свойствам сварного соединения с принятыми допущениями удовлетворяются, то свариваемость материала считается достаточной; если же не обеспечивается минимально приемлемый уровень хотя бы одного из эксплуатационных свойств, то свариваемость материала признается недостаточной.

Вопросам свариваемости НЛС 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) 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.

Увеличенное содержание углерода и легирующих элементов, характерное для НЛС повышенной прочности, а также требуемый высокий уровень механических свойств сварных соединений вызывают появление специфических трудностей при сварке сталей этой группы.

Первая трудность заключается в сложности предупреждения возникновения ХТ в зоне термического влияния (ЗТВ) и металле шва. 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. 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.

Вторая трудность заключается в сложности предупреждения образования горячих трещин (ГТ) в металле шва. Причинами образования ГТ при сварке являются наличие температурно-временного интервала хрупкости (ТИХ) и высокотемпературные деформации, которые развиваются вследствие затрудненной усадки металла шва и формоизменения свариваемых заготовок.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на сопротивляемость металла шва против образования ГТ, является его химический состав. Увеличение сопротивляемости металла шва образованию ГТ может быть также обеспечено путем изменения угла встречи первичных кристаллитов, величина которого определяется формой сварочной ванны, а также путем уменьшения величины и темпа нарастания растягивающих деформаций.

Третья трудность заключается в сложности получения металла шва, ЗТВ и сварного соединения в целом с механическими свойствами, равноценными или близкими к свойствам основного металла.

Таким образом, для получения качественного сварного соединения НЛС с позиций свариваемости необходимо, чтобы одновременно удовлетворялись следующие требования:

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

Существенные резервы обеспечения свариваемости НЛС скрыты в правильном выборе теплового режима сварки и состава металла шва, однако отсутствие научно обоснованной методики такого выбора требует, помимо опыта технолога, проведения большой экспериментальной работы.

Несомненными достоинствами экспериментальных методик являются достоверность получаемых оценок, вероятностный их характер, учитывающий специфические особенности испытываемых материалов; недостатками - большая ресурсоемкость, длительное время цикла подготовки, испытаний и обработки результатов, а в ряде случаев - интегральный характер оценки, не позволяющий выявить влияние отдельных физических процессов в металле.

Наряду с экспериментальными используются расчетно-экспериментальные методы определения показателей свариваемости, реализующие два основных методических подхода. Наиболее представительную группу составляют расчетные методы, использующие параметрические уравнения, полученные статистической обработкой экспериментальных данных. Они связывают выходные параметры (показатели свариваемости) с входными параметрами (химическим составом, толщиной, режимом сварки и т.п.) без анализа физических процессов в металле при сварке. Поэтому их применение ограничено областью, в пределах которой изменялись входные параметры при проведении экспериментов. К методам этой группы следует отнести оценки склонности НЛС к образованию горячих трещин по критерию HCS, к образованию ХТ по эквиваленту углерода в различных вариантах, расчет параметров трещинообразования P_w , P_s , P_n , показатель растрескивания CI , а также баллы UCS. При их использовании часто не учитывается все многообразие факторов и условий, влияющих на тот или иной показатель свариваемости (например, на сопротивляемость образованию трещин).

Второй подход предусматривает оценки показателей свариваемости на основе анализа физических процессов в металле при сварке на базе фундаментальных законов механики, металлофизики, тепло- и массопереноса, концептуальных физических моделей и т.п. Такие расчеты являются гораздо

более сложными по сравнению с методами первой группы, но чрезвычайно большой объем получаемой в результате полезной информации, универсальность и гибкость метода покрывают указанный недостаток, а применение ЭВМ позволяет ускорить исследовательские работы.

Такой подход реализован в разработанной в конце 80-х годов прошлого века в МГТУ им.Н.Э.Баумана программе «Свариваемость» на базе предложенной Э.Л.Макаровым концептуальной модели образования ХТ. Программа позволяет производить варианты расчеты для определения условий, исключающих образование ХТ в стыковых сварных соединениях закаливающих сталей. Результатами расчета являются структурный состав и комплекс механических свойств ЗТВ, размер действительного аустенитного зерна ОШЗ, концентрация диффузионного водорода в ОШЗ, уровень сварочных напряжений. Оценка стойкости к ХТ производится путем сопоставления действительных и критических значений факторов трещинообразования.

Бурное развитие ЭВМ определило значительные усилия исследователей по разработке прикладных программных средств в области имитационного моделирования сварочных процессов для получения новой количественной информации об энергетических, тепловых, диффузионных и деформационных процессах, позволяющей принимать инженерные решения и проектировать технологические процессы сварки.

Как правило, моделирование производится на базе фундаментальных физических законов путем решения системы дифференциальных уравнений с использованием конечноэлементной модели объекта. Типичными представителями таких продуктов можно назвать MAGSIM (анализ формирования стыкового и углового шва при MAG-сварке), SPOTSIM (анализ процесса контактной точечной сварки), WIGSIM (анализ формирования стыкового шва при WIG-сварке), BUTSIM (анализ процесса стыковой контактной сварки сопротивлением), LASIM (лазерная сварка), ELSIM (электронно-лучевая сварка) и многие другие. Особо следует упомянуть уникальные специализированные системы моделирования, позволяющие проводить комплексный анализ процессов, протекающих в изделии при сварке. Трудоемкость создания таких систем исчисляется сотнями человеко-лет, что определяет их весьма высокую стоимость (десятки тыс. USD) и, соответственно, значительно менее широкое (корпоративное) распространение. Такие системы как SYSWELD, Weld3D, СВАРКА позволяют решать уникальные по сложности прикладные задачи.

Глава 2. Математическое описание и моделирование процессов, протекающих в сталях при сварке.

Согласно современным представлениям формирование показателей свариваемости НЛС определяется протеканием в металле совокупности взаимосвязанных физико-металлургических процессов (рис.1). Для построения математической модели формирования показателей свариваемости НЛС при многослойной сварке проведен анализ существующих подходов к

математическому описанию отдельных физических процессов, протекающих в НЛС при сварке и термической обработке (ТО) с целью выявления моделей, пригодных для имитационного моделирования многослойной сварки. Проведенный анализ позволил также выявить ряд проблем, подлежащих решению в рамках представляемой диссертационной работы (выделены курсивом), и определить выбор адекватных средств моделирования.

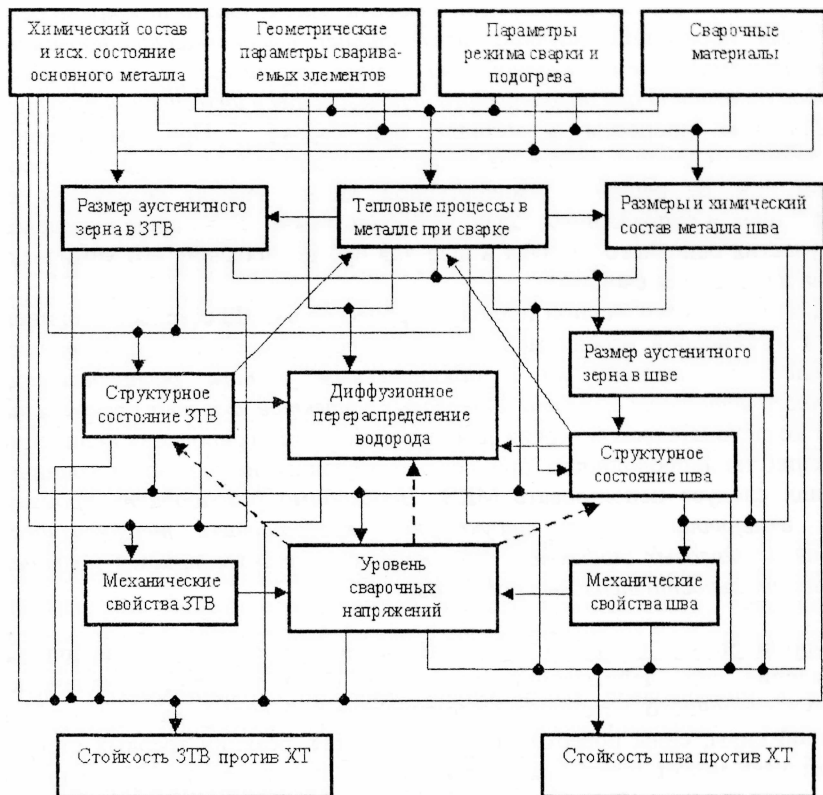


Рис. 1. Схема взаимосвязей показателей свариваемости низколегированных сталей с процессами в металле при сварке.

В области математического описания и моделирования сварочных процессов накоплен значительный материал, требующий обобщения. Наиболее проработанными в методическом и математическом отношении являются подходы к анализу процессов теплопереноса, диффузии и формирования напряженно-деформированного состояния в сварном соединении на основе метода конечных элементов (МКЭ). Основной проблемой моделирования указанных процессов является сложность получения надежных данных о

свойствах материала, которые являются структурно-зависимыми, и непрерывно изменяются в процессе термомеханического воздействия сварки. Для решения этой проблемы необходима формализация теплофизических и механических свойств, основанная на учете химического состава и структурного состояния материала, а также фактора температуры.

Подходы, основанные на МКЭ, весьма трудоемки и требуют высокой квалификации пользователя. В этой связи поставлена задача параллельной разработки двух версий имитационной модели: «исследовательской» на основе МКЭ (для проведения научных исследований высококвалифицированными пользователями) и «инженерной» на основе упрощений и аналитических подходов (пригодной для оперативного использования в инженерной практике).

Тепловые процессы в металле при сварке. При имитационном моделировании анализу процессов теплопереноса должно быть уделено особое влияние, т.к. от решения температурной задачи зависят результаты всех подчиненных и сопряженных задач. Особенно важно правильное определение доли участия основного металла в шве для прогнозирования его химического состава и комплекса свойств.

Для корректного анализа тепловых процессов в ОШЗ сварных соединений НЛС в инженерной версии модели возможно использование аналитических решений Н.Н.Рыкалина, но с обязательным учетом распределенности сварочного источника теплоты и тепловых эффектов фазовых превращений.

В исследовательской версии для численного интегрирования нелинейного уравнения теплопроводности при соответствующих начальных и граничных условиях следует использовать МКЭ. Необходимо разработать процедуры учета изменяющихся при структурных превращениях теплофизических свойств и тепловых эффектов превращений, а также приемы повышения производительности тепловых расчетов.

Формирование сварного шва. Очертания шва зависят от величины и направления сил, действующих на ванну: силы тяжести, механического действия сварочного источника (газодинамической силы), электромагнитной объемной силы, силы поверхностного натяжения, реакции твердых стенок; в ряде случаев может иметь значение и реакция паров металла. Исследованию влияния указанных факторов на формирование шва посвящены работы Акулова А.И., Бельчука А.И., Березовского Б.М., Демченко В.Ф., Демянцевича В.П., Ерохина А.А., Махненко В.И., Пацкевича И.Р., Рыбачука А.М., Рыкалина Н.Н., Судника В.А., Чернышова Г.Г., и др. исследователей.

Существующие способы расчета ориентированы прежде всего на определение геометрических параметров однопроходного шва (в основном для оценки величины проплава при сварке на весу, анализа возможности образования подрезов и других дефектов формирования шва). В основном преобладают эмпирический подход или сугубо теоретический, основанный на достаточно сложных уравнениях магнитогидродинамики.

Методы расчета геометрии многопроходных швов практически не получили развития. Из числа не слишком сложных для практической

реализации методик расчета основных размеров сварного шва следует выделить методику В.П.Демянцевича, которая основана на экспериментально установленных зависимостях коэффициента формы проплавления от параметров режима и разделки кромок при сварке и наплавке массивных изделий. Указанный подход представляется пригодным к использованию в инженерной модели для *определения параметров распределения сварочного источника теплоты методом решения обратной задачи, и дальнейшего определения очертаний зоны проплавления на основе решения тепловой задачи.*

Прогноз химического состава металла шва. Вопросам металлургии сварки низколегированных сталей посвящено большое число работ как отечественных ученых (Алов А.А., Багрянский К.В., Бадьянов Б.Н., Буки А.А., Бороненков В.Н., Ерохин А.А., Кох Б.А., Любавский К.В., Медовар Б.И., Новожилов Н.М., Подгаецкий В.В., Потапов Н.Н., Потапьевский А.Г., Походня И.К., Фрумин И.И. и др.), так и зарубежных исследователей (Ando K., Christensen N., Duvall D., Inagaki M., Kobayashi T., Rothshild G. и др.). Прогнозирование химического состава металла шва, основанное на термодинамических расчетах, является весьма трудоемким. Для приближенной оценки химического состава металла шва в инженерной версии принято решение об использовании эмпирических моделей, основанных на учете соотношения основного и наплавленного металла в шве и коэффициентах перехода легирующих элементов, значения которых зависят от состава сварочных материалов, защитного газа, режима сварки и других факторов.

Структурные превращения в сталях при сварке. В работах О.Г.Касаткина, Э.Л.Макарова, А.Н.Хакимова, П.Зайфферта и др. исследователей представлены статистические модели ограниченной области применимости, позволяющие прогнозировать окончательный фазовый состав структуры ЗТВ применительно к условиям однопроводной сварки.

Для математического описания полиморфных превращений в теории термической обработки используют дифференциальные уравнения, аналогичные уравнениям формальной химической кинетики. М. Авраами предложил для изотермических условий выражение:

$$p = 1 - \exp(-k(T) \cdot \tau^n) \quad (1)$$

где $p = V(\tau) / V_0$ – относительный объем новой фазы в момент времени τ ; $K(T)$ – кинетический параметр (константа скорости реакции); n – порядок реакции.

Параметры СТЦ значительно отличаются от циклов ТО сталей, в связи с чем для прогноза структурного состава и свойств сталей в условиях СТЦ однопроводной сварки используются специальные диаграммы анизотермического распада аустенита (АРА) при сварке, которые отличаются от традиционных термокинетических диаграмм.

Приложение диаграмм АРА к многослойной сварке требует дополнительной проработки, т.к. они не отражают процессов, происходящих на этапе нагрева, в то время как СТЦ многослойной сварки характеризуется

многократным повышением температуры, причем повторные нагревы, как правило, не приводят к полной аустенизации стали.

Текущее структурное состояние может быть рассчитано лишь на основе численного моделирования превращений в условиях СТЦ многослойной сварки. *Математический аппарат анализа структурных превращений в НЛС требует значительной доработки. Для прогнозирования структурного состава НЛС в условиях СТЦ многослойной сварки необходимо использовать универсальный подход, основанный на решении системы уравнений математической физики, описывающих кинетику протекания полиморфных превращений.*

Диффузионное перераспределение водорода. Изучению этого явления посвящены работы В.В.Фролова, И.К.Походни, Э.Л.Макарова, В.А.Кархина и многих других исследователей. В связи со сложностью получения достоверных данных экспериментальным путем, большинство исследований последних лет базируется на компьютерных моделях и численных экспериментах. При таком подходе основные трудности связаны не столько с математической стороной, сколько с физическими предположениями и проверкой достоверности полученных решений. Отдельной проблемой является получение температурных зависимостей диффузионных свойств (растворимости S_H и коэффициента диффузии D) различных зон сварного соединения в условиях термического цикла сварки.

В работах В.А.Кархина используется подход, основанный на понятии водородного потенциала, представляющего собой отношение текущей концентрации водорода к его растворимости в металле: $\Pi = c / S_H$. По мере протекания диффузионного процесса происходит выравнивание потенциала, градиент которого, таким образом, является движущей силой диффузии. Аналогичный подход применяется рядом зарубежных исследователей (J.V.Lebond, D.Nejem, D.Dubois, S.Talbot-Besnard и др.). В качестве основного уравнения используется 2-й закон Фика в форме

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \operatorname{div} \left(DS_H \operatorname{grad} \frac{c}{S_H} \right) \quad (2)$$

Подход с использованием функции водородного потенциала представляется наиболее перспективным, так как позволяет учесть температурные зависимости не только коэффициента диффузии, но и растворимости водорода. Численное решение уравнения диффузии должно проводиться методом конечных элементов (МКЭ) совместно с решением температурной задачи и задачи о структурных превращениях в материале.

Формирование комплекса механических свойств. Прогноз комплекса механических свойств различных зон сварного соединения, как правило, основан на учете вклада отдельных структурных составляющих в изменение соответствующего показателя (аддитивная модель).

В работах И.Гривняка, О.Г.Касаткина, П.Зайфферта, Х.Сузуки и многих других исследователей показано, что показатели свойств отдельных структурных составляющих НЛС могут быть оценены через содержание легирующих элементов и параметр $СТЦ$ – скорость w или время охлаждения t в характерном интервале температур. Для оценки механических свойств НЛС в зависимости от их химического и фазового состава в литературе представлено значительное количество регрессионных моделей. На основе анализа адекватности и применимости этих моделей принято решение об использовании в инженерной и исследовательской версиях моделей формирования механических свойств О.Г.Касаткина и П.Зайфферта.

Напряжения и деформации при сварке. В основе современной теории сварочных деформаций и напряжений лежат труды Г.В.Бондаренко, Г.А.Николаева, А.В.Дятлова, Е.О.Патона, Н.О.Окерблома, В.П.Вологодина, Л.А.Гликмана, Д.И.Грекова, С.А.Кузьмина, И.П.Байковой и других советских исследователей, разработавших прогрессивные для своего времени аналитические и графо-аналитические методы расчета. Качественно новым явился переход к использованию аппарата теории упругости и пластичности в работах О.А.Бакши, Г.Б.Талыпова, В.С.Игнатьевой, В.И.Махненко, В.М.Сагалевица, В.А.Винокурова, А.Г.Григорьянца, С.Н.Киселева, Г.П.Карзова, А.С.Куркина и других исследователей. Развитие численных методов и вычислительной техники привело к появлению специализированных программных средств, пригодных для расчета деформаций и напряжений при сварке - SWAPKA, Weld3D, SYSWELD, ANSYS, MARC и др.

Выбор МКЭ с использованием аппарата теории упругости и пластичности в качестве средства расчета НДС в сварных соединениях очевиден для исследовательской версии. Для инженерной версии необходима *разработка упрощенного (сопроматического) подхода, основанного на балочной модели соединения и основных положениях классической теории сварочных деформаций и напряжений для определения поперечной компоненты σ_y , связанной с поперечной усадкой сварного шва.*

Прогноз образования холодных трещин при сварке. Оценка стойкости сварного соединения против образования ХТ согласно концепции Э.Л.Макарова может быть произведена путем сопоставления действительных и критических факторов трещинообразования. Наиболее удобен и привычен для сравнения фактор напряжений, поэтому условие стойкости к ХТ может быть записано как

$$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{кр}} \quad (3)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное растягивающее напряжение в зоне возможного образования очага ХТ, т.е. первое главное напряжение σ_1 .

Величина критического (разрушающего) напряжения $\sigma_{\text{кр}}$ зависит от фазового состава S_0 структуры НЛС, размера действительного аустенитного

зерна d_3 , концентрации H_0 диффузионного водорода в зоне возможного образования очага ХТ, и содержания углерода C :

$$\sigma_{\text{кр}} = f(C, S_0, H_0, d_3) \quad (4)$$

Следует отметить, что приведенная модель соответствует среднему значению минимального разрушающего напряжения $\sigma_{\text{р.мин}}$, полученному при испытаниях на замедленное разрушение образцов, обработанных имитированным СТП. По мере выхода водорода из металла показатель сопротивляемости образованию ХТ увеличивается.

В условиях сварки на величину показателя сопротивляемости ОШЗ оказывают влияние теплофизические свойства металла шва. При кристаллизации шва ОШЗ подвергается дополнительному тепловому воздействию вследствие выделения скрытой теплоты затвердевания. В условиях многослойной сварки формирование показателя сопротивляемости протекает в еще более сложных условиях. Для прогнозирования образования ХТ в сварных соединениях при многослойной сварке необходимо разработать методику учета влияния температурно-временного фактора и химического состава металла шва на показатель сопротивляемости образованию очага ХТ.

На основе проведенного анализа приняты решения о путях реализации инженерной и исследовательской версий модели анализа формирования показателей свариваемости НЛС при многослойной сварке.

При разработке компьютерных средств оперативного анализа, предназначенных для использования в инженерной практике, необходимо взять за основу методический подход Э.Л.Макарова, реализованный в программе «Свариваемость».

При разработке компьютерных средств, предназначенных для проведения НИР в области свариваемости НЛС, необходимо взять за основу конечноэлементный программный комплекс «СВАРКА».

Глава 3. Разработка математической модели анализа технологического процесса многослойной сварки низколегированных сталей

Математическая модель (ММ) вида $Y = M(X)$ является математическим аналогом исследуемого объекта. Подобные модели принадлежат к числу имитационных и решают задачу анализа, т.е. позволяют получать значения показателей (вектор Y) при заданном наборе входных параметров (вектор X). Корректность анализа определяется степенью адекватности модели исследуемому объекту.

Сложность и взаимосвязь физических процессов, протекающих в металле при сварке (рис.1), определяют необходимость применения системного подхода, который допускает декомпозицию (расчленение) сложного объекта в систему более простых взаимосвязанных между собой частей, каждую из которых, в свою очередь, можно рассматривать как сложный объект, состоящий из более простых элементов.

Анализ взаимосвязей процессов, протекающих в НЛС при сварке и определяющих формирование показателей свариваемости (рис. 1), показывает, что эти взаимодействия могут быть описаны ветвящейся структурой с обратными связями. Наличие обратных связей требует совместного рассмотрения процессов, что приводит к усложнению ММ. Для принятия обоснованного решения об упрощениях модели необходим анализ существенности выявленных обратных связей.

Обратное влияние структурных превращений на протекание тепловых процессов связано с изменением теплофизических свойств материала при превращениях, а также с тепловыми эффектами этих превращений. Эти эффекты являются ощутимыми и определяют, в частности, влияние шва на показатель сопротивляемости ОШЗ образованию ХТ. Учет этой взаимосвязи возможен прямо (путем совместного решения температурной и структурной задач в исследовательской версии), либо косвенно (через эталонные материалы) в инженерной версии.

В результате принятых допущений в «инженерной ММ» отсутствуют обратные связи, и моделирование сводится к последовательному анализу процессов в порядке, определенному структурой связей на рис. 1. В условиях многослойной сварки НЛС взаимосвязи между отдельными процессами при выполнении каждого прохода сохраняются. Для уменьшения трудоемкости «инженерной ММ» возможно рассмотрение формирования показателей свариваемости не во всем объеме изделия, а лишь в наиболее опасной с точки зрения образования ХТ околошовной зоне (ОШЗ) сварного соединения, положение которой может быть заранее определено. Целесообразно сначала выполнить подготовительную работу, связанную с определением положений и размеров нагретых зон, выбором наиболее опасных точек ОШЗ и т.п. После этого для выбранных точек проводится подробный анализ процессов по единой схеме для каждого сварочного прохода. Такой алгоритм (рис.3) лежит в основе «инженерной ММ» и разработанном в МГТУ им.Н.Э.Баумана программном продукте, который впоследствии стал известен как инженерный программный комплекс «Свариваемость легированных сталей».

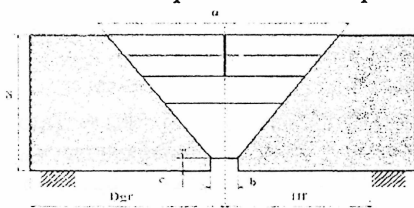


Рис. 2. Расчетная схема соединения

Положение сварных швов определяется принятой схемой заполнения разделки кромок свариваемых деталей. В инженерной версии рассматривается только стыковое соединение с симметричной V - образной разделкой кромок (рис.2), описываемое четырьмя размерами – толщиной δ , зазором b ,

притуплением c , а также суммарным углом разделки кромок α . При малом угле α такая схема соответствует щелевой разделке. Схема укладки валиков в разделку предусматривает корневой валик, на который может быть наложено несколько одноваликовых слоев, и далее слои с раскладкой по 2 валика в слой.

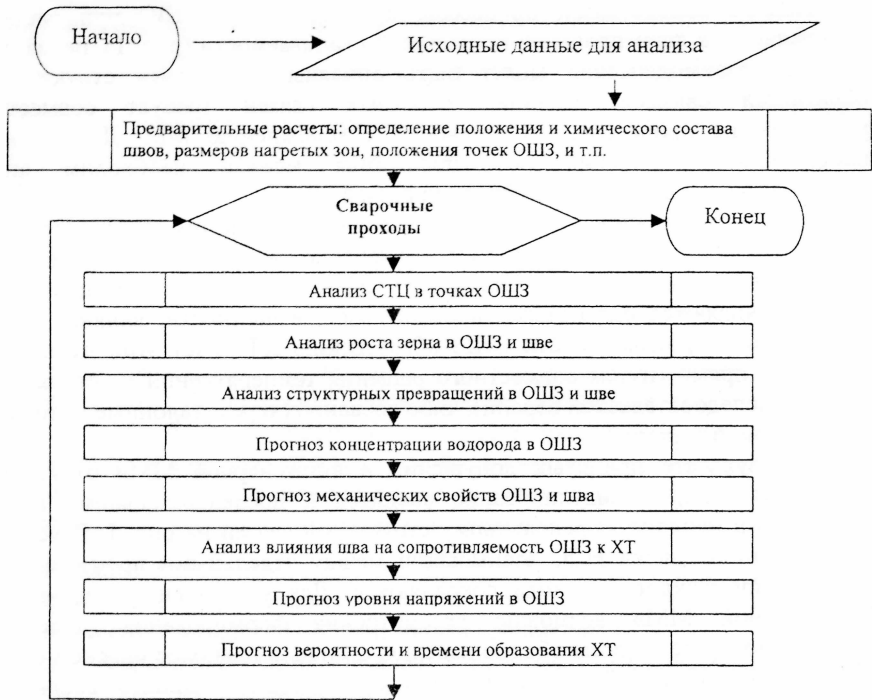


Рис. 3. Алгоритм анализа процессов формирования показателей свариваемости НЛС при многослойной сварке

В связи с такой схемой введено требование одинакового режима сварки валиков в пределах одного слоя. Для разных слоев режимы и способы сварки могут различаться.

Решение тепловой задачи при многослойной сварке. В инженерной версии используется расчетная схема плоского слоя с адиабатическими границами согласно классической теории Н.Н.Рыкалина. Для корректного анализа тепловых процессов в ОШЗ и воспроизведения реальных форм проплавления принято решение об использовании распределенного источника, который представляется суперпозицией ограниченного числа сосредоточенных (точечных) источников, положение и соотношение мощностей которых определяется по специальному алгоритму. Температура в любой точке определяется по формуле:

$$T = T_0 + \frac{K \cdot Q}{4\pi\lambda} \cdot \sum_{i=1}^3 A_i \cdot \left\{ \sum_{j=1}^3 \frac{1}{R_{ij}} \cdot \exp \left[-\frac{v_{CB}}{2a} \cdot (R_{ij} + x) \right] \right\} \quad (5)$$

где K - поправочный коэффициент, учитывающий разделку кромок и положение источника в разделке; A_i - коэффициенты распределения мощности между источниками.

Определение неизвестных параметров источников производится путем последовательного решения двух задач:

1. Прямая задача - прогноз очертаний зоны проплавления при наплавке валика в канавку, форма которой соответствует разделке кромок свариваемых деталей. На этом этапе используются 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. Для решения этой задачи на линии, описывающей форму зоны проплавления, рассматриваются несколько точек, максимальные температуры в которых T_{MAX} должны отличаться от $T_{пл}$ не более, чем на заранее заданную величину ΔT_{MAX} .

При анализе однопроходной сварки или укладки корневого валика в V-образную разделку дополнительно решается 3-я задача - определение размеров зоны проплавления деталей ограниченной толщины от распределенного источника теплоты, полученного при решении задачи 2. На этом этапе расчета проявляется влияние ограниченности толщины деталей на увеличение глубины проплавления. Данный расчет опирается на рабочую гипотезу о взаимно независимом влиянии распределенности источника и толщины свариваемых де-

талей на форму проплавления. Изложенный подход был верифицирован по литературным и экспериментальным данным, что обеспечивает необходимую достоверность прогнозов соотношения основного и наплавленного металла в шве.

Выбор наиболее опасных точек.

Известно, что минимальная сопротивляемость НЛС замедленному разрушению устанавливается при максимальной температуре СТЦ, которая соответствует началу оплавления границ зерен. В этой связи анализ СТЦ и всех термически активируемых процессов проводится только для точек ОШЗ с $T_{MAX} = 1350^\circ\text{C}$. В инженерной версии для каждого слоя рассматриваются 3 точки в нижней и верхней части ОШЗ (рис. 4).

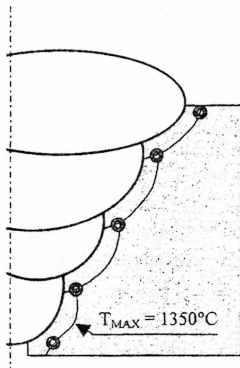


Рис. 4. Схема положения анализируемых точек ОШЗ

Моделирование структурных превращений в условиях СТЦ многослойной сварки производится путем решения системы уравнений математической физики, описывающих кинетику полиморфных превращений. Такой подход является более сложным, чем простое наложение СТЦ на диаграмму превращений материала (при этом моделирование структурных превращений сводится к интерполяции по таблицам, описывающим диаграмму), но он позволяет учесть немонокотное изменение температуры в условиях СТЦ многослойной сварки. Для реализации данного подхода были формализованы описание материала и его диаграмма превращений, определены условия протекания превращений и их направления, установлены температурные зависимости кинетических коэффициентов в уравнениях превращений.

Схематизация материала. Материал, помимо химического состава, представлен совокупностью его структурных компонентов, к которым отнесены жидкая фаза (Ж), аустенит (А), феррито-перлитная смесь (ФП), бейнит (Б), мартенсит (М) и продукты отпуска мартенсита (МО). Такое деление отражает основные продукты структурных превращений НЛС.

Количество структурного компонента в материале характеризуется его массовой долей, т.е. безразмерной величиной, изменяющейся в пределах 0...1. Сумма всех компонентов всегда равна единице.

Схематизация диаграммы превращений. Каждый структурный компонент имеет свою температурную область существования и свойства, зависящие только от температуры. Каждой температуре соответствует единственно возможное превращение каждого структурного компонента, определяемое диаграммой состояния. Вся температурная шкала разбита на характерные для класса низколегированных сталей температурные интервалы, границы которых определяются характерными равновесными температурами (табл. 1).

Таблица 1.

Характерные для НЛС температурные интервалы и их краткая характеристика

Границы интервала	Характеристика интервала, возможные реакции
Выше T_L	Интервал существования только жидкой фазы (Ж = 1)
$(T_L - T_S)$	Интервал плавления или кристаллизации: (Ж $\leftrightarrow$ А). Существование только жидкой фазы и аустенита.
$(T_S - A_3)$	Аустенитная область. Возможно существование всех фаз, кроме жидкой. Последовательный распад по схеме (М $\rightarrow$ МО $\rightarrow$ Б $\rightarrow$ ФП $\rightarrow$ А).
$(A_3 - A_1)$	Область неполной аустенизации. Возможно существование всех фаз, кроме жидкой. Последовательный распад по схеме (М $\rightarrow$ МО $\rightarrow$ Б $\rightarrow$ ФП $\rightarrow$ А), а также (А $\rightarrow$ ФП) в направлении равновесного соотношения А и ФП.
$(A_1 - T_{БН})$	Область перлитного превращения. Распад аустенита (А $\rightarrow$ ФП) и отпуск (М $\rightarrow$ МО $\rightarrow$ Б $\rightarrow$ ФП)
$(T_{БН} - T_{МН})$	Область бейнитного превращения. Распад аустенита (А $\rightarrow$ Б) и отпуск (М $\rightarrow$ МО $\rightarrow$ Б)
$(T_{МН} - T_{МК})$	Область мартенситного превращения. Бездиффузионный распад (А $\rightarrow$ М) и отпуск (М $\rightarrow$ МО)
$(T < T_{МК})$	Область стабильного существования М, МО, Б, ФП. Существование аустенита невозможно (А = 0).

Разброс химического состава является одной из причин различий кинетики превращений сталей разных плавок, поэтому использование диаграммы из справочника не обеспечит достоверных результатов моделирования даже в пределах одной марки. Учитывая внешнее сходство диаграмм для сталей одного класса, было выполнено моделирование самой диаграммы АРА с учетом действительного химического состава исследуемой стали.

Алгоритм анализа структурных превращений. В соответствии с диаграммой состояния материала каждое превращение возможно в определенном температурном интервале (табл.1) в направлении достижения термодинамического равновесия фаз. Каждое превращение, протекающее по диффузионному механизму, рассматривается как реакция первого порядка и описывается дифференциальным уравнением вида

$$\Delta p / \Delta t = p(t) \cdot K_p(T) \quad (6)$$

где $p(t)$ – текущая доля фазы в структуре стали, $K_p(T)$ – функция распада, т.е. мгновенная скорость изменения относительной доли фазы, зависящая для данного вида превращения только от температуры. Для каждой фазы определяется своя функция распада. Процесс изменения температуры представляется совокупностью коротких изотермических выдержек, что позволяет согласовать численное решение температурной и структурной задач.

Исходными данными для моделирования превращений на коротком участке изотермической выдержки (рис.6) являются температура выдержки T , время выдержки τ , текущее соотношение структурных компонентов, а также вектор констант материала, содержащий значения характерных температур, кинетические коэффициенты функций распада, величины тепловых эффектов превращений и другие необходимые для расчета величины, определенные заранее. Результатом анализа является новое соотношение структурных компонентов и изменение энтальпии материала.

С целью уменьшения времени обработки данных при численном моделировании порядок анализа температурных материалов выбран в направлении повышения температуры. Этот порядок выгоден, т.к. при сварке основная часть материала большую часть времени имеет низкую температуру.

Функции распада фаз М, МО, Б, ФП имеют вид зависимостей Аррениуса:

$$K_p(T) = K \cdot \exp(-B/T) \quad (7)$$

где K и B – величины, определяемые по экспериментальным кривым отпуска стали или статистическим моделям. Эти функции используются для расчета всех стадий последовательного распада по схеме (М → МО → Б → ФП → А).

Для математического описания функции распада аустенита были приняты допущения, что превращение происходит только в заданном температурном интервале, максимальная скорость превращения соответствует середине интервала, а на границах интервала скорость превращения равна нулю.

В первом приближении выбран параболический закон изменения скорости превращения в заданном интервале температур, отвечающий условиям (б) и (в). Функция имеет вид:

$$K(T) = K_0 \cdot (T - T_{\text{МИН}}) \cdot (T_{\text{МАХ}} - T) \quad (8)$$

где K_0 – константа, подлежащая определению; $T_{\text{МАХ}}$, $T_{\text{МИН}}$ – верхняя и нижняя границы температурного интервала.

Термокинетические коэффициенты K_0 , входящие в уравнения превращений аустенита, определяются из диаграммы АРА методом решения обратной задачи. Для этого, моделируя охлаждение по известному закону, необходимо подобрать значения коэффициентов, обеспечивающих получение заданного конечного соотношения структурных компонентов. Полученные значения используются в дальнейшем для моделирования при произвольном законе нагрева и охлаждения.

Проведенные тестовые расчеты показали работоспособность указанного подхода, который позволяет, в частности, воспроизводить дилатометрические кривые (рис.7). Для расчетного построения дилатометрической кривой необходимо располагать температурными зависимостями плотности отдельных структурных компонентов $\gamma_i(T)$ и знать закономерности изменения соотношения массовых долей $p_i(T)$ этих компонентов в структуре материала:

$$\varepsilon_{\alpha}(T) = \frac{1}{3} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{p_i(T)}{\gamma_i(T)} \right]}{V_0} - 1 \right\} \quad (9)$$

где V_0 – исходный удельный объем материала, принимаемый за базу.

Верификация разработанных моделей проводилась по экспериментальным дилатометрическим кривым и результатам замеров твердости HV образцов из сталей 10Г2, 20Г, 25ХГСА, 10ГНЗМ и 12ХГН2МФ, обработанных имитированным термическим циклом на установке МИС-1М с компьютерной системой управления. Нагрев закаленных образцов размером 100x10x1,5 мм производился протекающим током по заданной программе, имитирующий повторные нагревы при многослойной сварке, а ускоренное охлаждение образца обеспечивалось с помощью водо-воздушной смеси. Погрешность расчетных данных, которая во всех случаях не превышала 8%, объясняется тем, что модель поведения материала отражает не все происходящие в реальном металле процессы (например, гомогенизацию аустенита, образование и растворение карбидов, фазовый наклеп и т.п.).

Расчет содержания водорода в ОШЗ. Численный анализ диффузионного перераспределения водорода в поперечном сечении соединения при многослойной сварке сводится к последовательному выполнению стандартного набора действий: расширение области интегрирования и изменение граничных условий при укладке очередного валика, насыщение его исходным водородом,

определение величин шагов интегрирования по времени и организацию вычислений в пределах каждого шага. На каждом шаге проводится расчет температур, величин растворимости и коэффициента диффузии, и численное интегрирование уравнения (2).

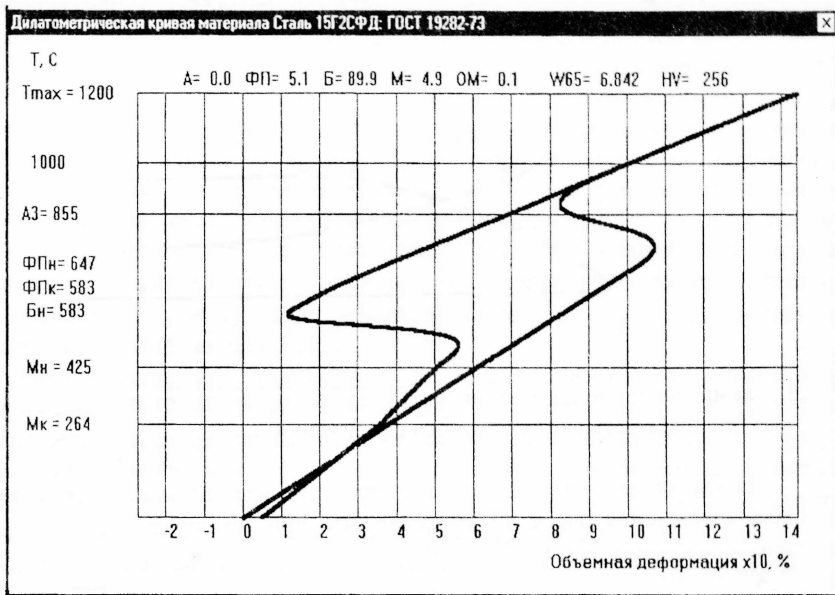


Рис. 7. Дилатометрическая кривая, полученная расчетом

Расчет уровня поперечных остаточных напряжений. В инженерной версии в качестве расчетной схемы используется модель балки, защемленной по концам и имеющей участки различной жесткости.

При расчете используются допущения о том, что предел текучести материала при температурах выше 600°C пренебрежимо мал, а сечение частично заваренного шва деформируется упруго. Эпюра поперечных напряжений σ_y после укладки очередного валика многослойного шва формируется с учетом распределения напряжений, сформировавшихся после укладки предыдущего валика, условий закрепления конструкции, снижения напряжений в зоне, претерпевшей нагрев выше 600°C при укладке текущего валика; поперечной усадкой, а также фазовой дилатацией шва и ЗТВ.

Алгоритм расчета предусматривает последовательное рассмотрение ситуаций, складывающихся после выполнения каждого валика многослойного сварного шва; при этом используются результаты решения тепловой и структурной задач.

Прогноз образования ХТ при многослойной сварке. При многослойной сварке структурно-водородное и напряженное состояние сварного соединения

непрерывно изменяется, поэтому для оценки образования ХТ необходимо рассматривать критериальное соотношение (3) не как простое соотношение величин, а как соотношение процессов формирования показателя сопротивляемости $\sigma_{кр}$ и изменяющегося уровня напряжений $\sigma_{св}$ (рис.8). Момент образования очага ХТ ($t = \tau_{ХТ}$) соответствует точке пересечения кривых $\sigma_{св}$ и $\sigma_{кр}$.

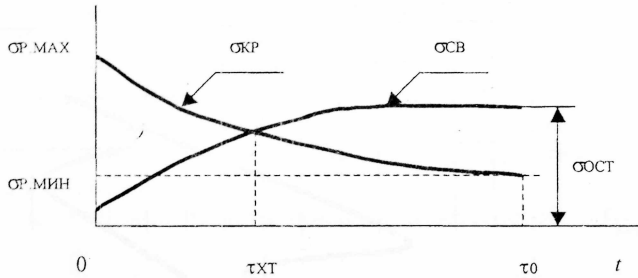


Рис.8. Схема соотношения уровня напряжений $\sigma_{св}$ и сопротивляемости $\sigma_{кр}$ в процессе остывания сварного соединения

Из имеющихся данных по температурно-временным характеристикам процесса зарождения очага ХТ известно, что при температурах свыше 200°C случаев образования ХТ не было зафиксировано, а при температурах свыше 150°C ХТ образуются крайне редко. Минимальный уровень сопротивляемости $\sigma_{р.мин}$ достигается в НЛС примерно через 2 часа после закалки и практически остается постоянным в интервале температур от комнатной до $+80^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее увеличение этого показателя связывают обычно с выходом водорода из сварного соединения. С повышением уровня статической нагрузки при испытаниях наводороженных образцов на замедленное разрушение время испытаний (до разрушения образца) сокращается, что свидетельствует о постепенном снижении сопротивляемости по мере истощения инкубационного периода. Приближенное описание закономерностей формирования показателя $\sigma_{кр}$ возможно в предположении, что для рассматриваемого материала он имеет 2 предельных значения:

$$\sigma_{р.мин}(T) = \sigma_{р.мин} + [\sigma_{р.макс} - \sigma_{р.мин}] \cdot \varphi(T); \quad (10)$$

$$\sigma_{кр}(T, t) = \sigma_{р.мин}(T) + [\sigma_{р.макс} - \sigma_{р.мин}(T)] \cdot \psi(t); \quad (11)$$

где $\sigma_{р.макс}$ — максимальное значение показателя сопротивляемости, которое можно соотнести с пределом прочности;

$\varphi(T)$, $\psi(t)$ — функции, изменяющиеся в пределах $0 \dots 1$ и отражающие влияние температурного и временного факторов.

С учетом опытных данных о температурных условиях образования ХТ функция $\varphi(T)$, учитывающая влияние температурного фактора, определена как

$$\varphi(T) = 0,5 + \frac{1}{\pi} \arctg \left[\frac{\operatorname{tg}(0,45\pi)}{T_2 - T_1} (2T - T_1 - T_2) \right] \quad (12)$$

где T_1 и T_2 - температуры, соответствующие границам областей практической стабилизации величины $\sigma_{\text{кр}}$ на минимальном и максимальном уровнях, т.е. значениям $\varphi(T_1) = 0,05$ и $\varphi(T_2) = 0,95$. Для НЛС $T_1 = 80^\circ\text{C}$ и $T_2 = 160^\circ\text{C}$.

Оценка влияния металла шва на сопротивляемость ОШЗ образованию ХТ основана на том, что изменение показателей сопротивляемости НЛС в зависимости от использования различных сварочных материалов в основном определяется соотношением температур солидус металла шва и ликвидус основного металла. В исследовательской версии это влияние учитывается автоматически за счет изменения высокотемпературной части СТП от теплового эффекта при кристаллизации шва. В инженерной версии используется приближенная оценка K_σ , характеризующая степень положительного ($K_\sigma > 1$) или отрицательного (при $K_\sigma < 1$) влияния на показатель сопротивляемости НЛС.

Оценка вероятности образования ХТ. Необходимость вероятностного подхода связана с тем, что в соотношении (3) используются приближенные значения величин, рассчитанные либо на основе статистических моделей ($\sigma_{\text{кр}}$), либо на основе физических моделей с использованием приближенных значений свойств материала и нагрузок ($\sigma_{\text{св}}$), и говорить о справедливости альтернативной оценки (3) можно лишь с определенной долей вероятности.

Под вероятностью появления ХТ следует понимать вероятность такого события, когда истинное значение величины $\sigma_{\text{св}}$ превысит истинное значение величины $\sigma_{\text{кр}}$:

$$P(\text{ХТ}) = P(\sigma_{\text{св}} > \sigma_{\text{кр}}) \quad (13)$$

Принимая значения этих величин за их математические ожидания, можно записать для каждой из них выражения функции плотности вероятности. Величины среднеквадратичных отклонений возможно приближенно оценить по

заявленной точности моделей. Так, по данным Э.Л.Макарова, для модели $\sigma_{\text{кр}}$ можно взять за основу величину $s = 0,05\sigma_{\text{кр}}$. Точность расчета уровня остаточных напряжений в лучшем случае соответствует $\pm 20\%$. Графическая интерпретация рассматриваемой ситуации представлена на рис. 9. Для известного истинного значения $\sigma_{\text{св}} = \zeta$ с учетом нормального распределения $\sigma_{\text{кр}}$ вероятность события $\sigma_{\text{св}} > \sigma_{\text{кр}}$ определяется как

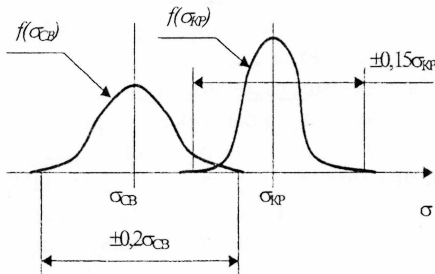


Рис. 9. Схема для расчета вероятности образования ХТ

$$P^*(\zeta) = \frac{1}{0,05\sigma_{KP}\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{0,85\sigma_{KP}}^{\zeta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma - \sigma_{KP}}{0,05\sigma_{KP}}\right)^2\right] d\sigma \quad (14)$$

Для учета закона распределения σ_{CB} необходимо выполнить двойное интегрирование:

$$P_{XT} = \frac{1}{0,07\sigma_{CB}\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{0,8\sigma_{CB}}^{1,2\sigma_{CB}} P^*(\sigma) \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma - \sigma_{CB}}{0,07\sigma_{CB}}\right)^2\right] d\sigma \quad (15)$$

Выражение (15) пригодно для определения P_{XT} при сварке одного валика. При многослойной сварке соотношения между определяющими показателями периодически изменяются. То, что трещины в материале, к сожалению, не устраняются никакой термической обработкой, дает основания рассматривать факт зарождения трещины после каждого воздействия на материал как независимые случайные события, разнесенные во времени, и применять к ним правило сложения вероятностей. Тогда вероятность события «очаг ХТ существует» для каждого момента времени складывается из вероятности события «очаг ХТ образовался ранее» и произведения вероятностей событий «очага ХТ нет» и «очаг ХТ образовался в рассматриваемый период»:

$$P(XT)_i = P(XT)_{i-1} + [1 - P(XT)_{i-1}] \cdot P_{XT} \quad (16)$$

В рекуррентном выражении (16) индексы соответствуют номерам рассматриваемых периодов (номерам проходов), а P_{XT} вычисляется для текущего периода согласно (15). Естественно, что для первого прохода событие $P(XT)_{i-1}$ «очаг ХТ образовался ранее» является невозможным.

Прогноз момента времени образования ХТ. Для проведения такой оценки необходимо рассмотреть кинетику изменения значений величин (рис.8), входящих в соотношение (3). За меру такой оценки τ_{XT} принят момент времени, соответствующей достижению наперед заданного (порогового) значения P^* вероятности P_{XT} , вычисляемой согласно (15) в рассматриваемый период. Вычисление сводится к решению трансцендентного уравнения $P_{XT}(t) - P^* = 0$ относительно времени t , которое затем отождествляется с τ_{XT} .

Инженерный программный комплекс «Свариваемость легированных сталей». Разработанная математическая модель анализа комплекса процессов, формирующих показатели свариваемости НЛС при многослойной сварке, реализована в виде отдельного программного модуля, служащего ядром ИПК «Свариваемость легированных сталей». Кроме модуля анализа, в состав комплекса входят модуль ввода и корректировки исходных данных, модуль построения диаграммы АРА, модуль представления результатов расчетов.

ИПК «Свариваемость легированных сталей» предназначен для оперативного анализа технологических вариантов многослойной сварки типовых стыковых соединений жестко закрепленных элементов из НЛС, а также для определения значений конструктивно-технологических параметров,

обеспечивающих стойкость сварного соединения против ХТ. Комплекс внедрен и используется в НИР и учебном процессе МГТУ, МЭИ, МИИТ, ГАНГ им.И.М.Губкина, ПГТУ (Пермь), ДГТУ (Ростов), ТолПИ (Тольятти).

Глава 4. Расширение возможностей исследовательского программного комплекса «СВАРКА»

Для обеспечения возможности анализа свариваемости НЛС в блок решения были включены модули анализа структурных превращений материала и анализа диффузионного перераспределения водорода по сварному соединению. Согласованное решение температурной и структурной задач позволяет учесть кинетику изменения структурно-зависимых свойств и фазовую дилатацию материала при анализе НДС. Обновленная структурная схема программного комплекса «СВАРКА» приведена на рис. 10.

Развитие препроцессорной части комплекса «СВАРКА» позволило создать унифицированную структуру данных о материале на основе концепции представления материала совокупностью его структурных составляющих. Температурная зависимость каждого свойства каждой структурной составляющей материала задается отдельно. Значение свойства материала в целом определяется как

$$X = \sum_{i=1}^n p_i X_i \quad (17)$$

где под X подразумевается некоторое свойство i -й структурной составляющей материала при заданной температуре, p_i – доля составляющей в структуре. Такой подход является универсальным и позволяет описать все возможные структурные состояния материала при различных температурах.

Предусмотрена возможность назначения типовых температурных зависимостей свойств НЛС, которые рассчитываются по химическому составу на основе использования эмпирических представлений об общих закономерностях изменения свойств структурных составляющих НЛС при различных температурах. Расчет параметров диаграммы превращений производится автоматически. Исходное состояние материала определяется исходным соотношением его структурных составляющих, которое может быть задано явно или рассчитано по циклу ТО. Таким образом, процедуры анализа структурных превращений, описанные в гл.3, используются уже на этапе подготовки данных для расчета.

Совместное решение тепловой и структурной задач. Расчет структурных превращений производится на каждом шаге решения тепловой задачи, т.к. структурная и тепловая задачи являются сопряженными - структурные превращения сопровождаются тепловыми эффектами, в процессе превращений изменяется соотношение структурных компонентов и теплофизические свойства материала. При явной схеме расчета каждый шаг производится в 2 этапа. Первый этап - изотермическая выдержка в течение времени шага при температуре начала шага. На этом этапе происходят структурные превращения

и определяется их тепловой эффект. Результатом является новое структурное состояние и свойства, которые используются на следующем шаге. Второй этап - определение приращения температуры в элементе по изменению энтальпии материала, что обеспечивает консервативность расчетной схемы. Шаг расчета по времени выбирается автоматически в зависимости от геометрии элемента, свойств материала и граничных условий 3 рода.

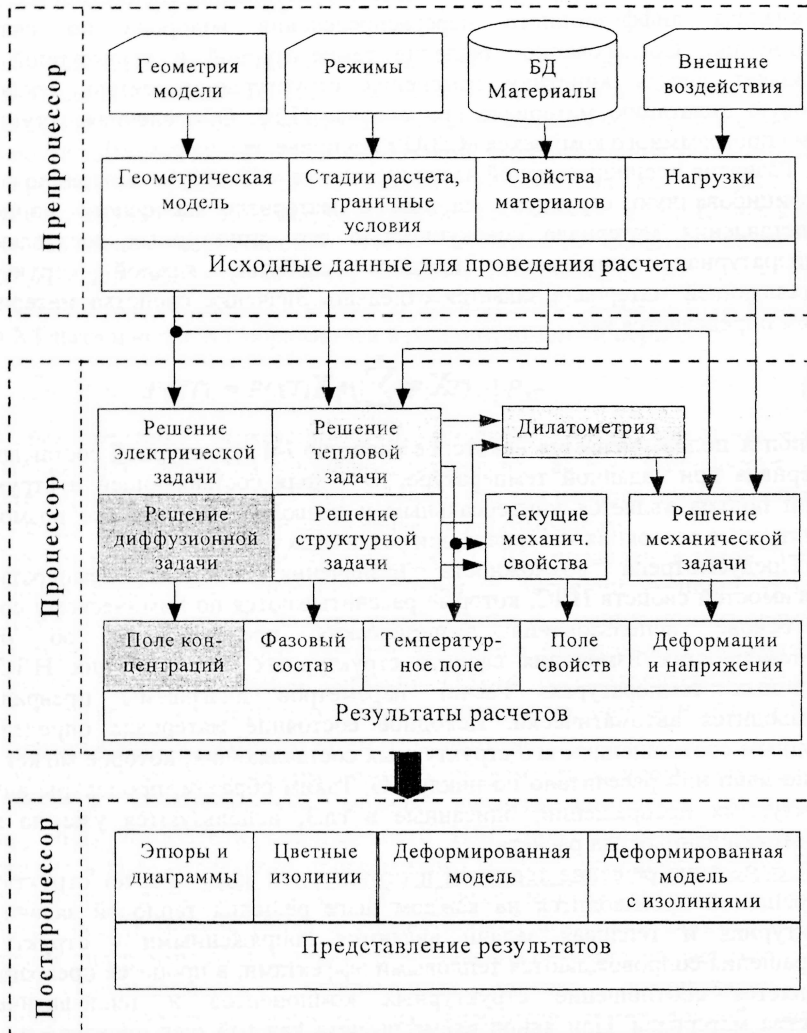


Рис. 10. Структурная схема программного комплекса «СВАРКА»

Повышение производительности расчетов. Тепловая задача наиболее критична к шагу по времени при использовании явной схемы решения. Учитывая то, что сварочный нагрев и охлаждение при высоких температурах происходят с большой скоростью, использование явной схемы оправдано, т.к. при неявной схеме решения легко упустить нюансы высокотемпературной области. Однако на этапе выравнивания температур, когда скорости охлаждения заметно снижаются, целесообразно вести расчет, используя неявную схему счета. Критерием перехода от одной схемы к другой служит разность между текущими значениями максимальной и минимальной температур в элементах модели.

Глава 5. Разработка методики оптимизации параметров технологического процесса многопроходной сварки низколегированных сталей на базе математической модели анализа процесса

Проектирование оптимальной технологии сварки заключается в выборе способа сварки, сварочных материалов, определении параметров режима и условий сварки, а также дополнительных технологических мероприятий, обеспечивающих требуемое качество сварного изделия и наилучшие технико-экономические и производственные показатели. Техническое задание (ТЗ) обычно оговаривает перечень и диапазон допустимых значений показателей качества сварного соединения в виде технических требований (ТТ).

Для компьютерного проектирования используется инженерная ММ формирования показателей свариваемости, в которой с целью уменьшения трудоемкости расчетов анализ диффузионного перераспределения водорода проводится с использованием компактных регрессионных моделей, благодаря чему время анализа одного технологического варианта составляет сотые доли секунды при использовании современных ПЭВМ. Степень выполнения каждого из ТТ учитывается при вычислении целевой функции, поиск экстремального значения которой проводится с использованием идей методов наискорейшего спуска и проекции градиента.

Оптимизация параметров технологии сварки НЛС проводится в два этапа. На первом этапе обеспечивается достижение требуемых показателей свариваемости основного металла за счет оптимизации параметров режима и подогрева. Предварительно оценивается возможность достижения приемлемого решения, для чего строится карта свариваемости материала (рис. 11), отражающая возможность обеспечения удовлетворительного формирования шва (линии 1 и 2), достижения требуемого структурного состояния ЗТВ (линии 3 и 4) и обеспечения стойкости к образованию ХТ (выше линии 5). Область приемлемых тепловых режимов в системе координат «погонная энергия – температура подогрева» ограничивается линиями 1 – 5, положение которых зависит от химического состава стали, конструкции соединения, и комплекса предъявляемых к соединению ТТ.

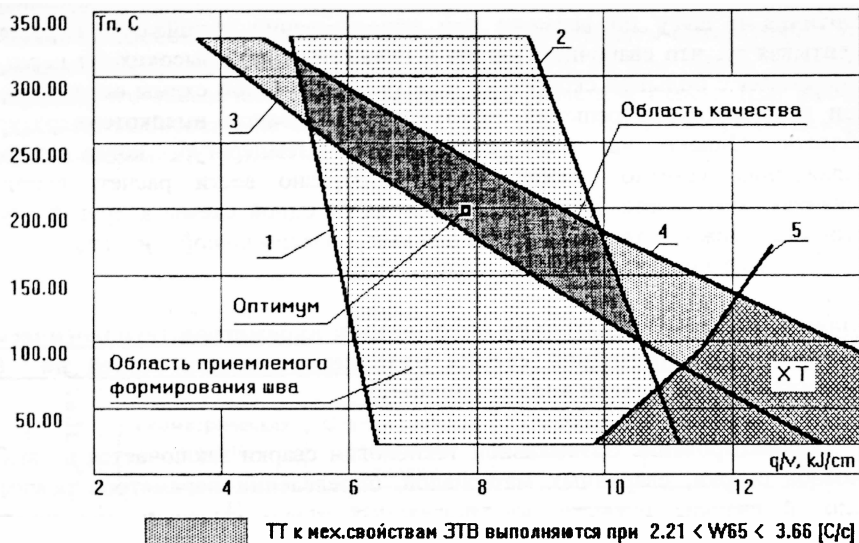


Рис. 11. Карта свариваемости стали 30ХГСА при сварке в защитных газах стыкового соединения жестко закрепленных элементов толщиной 6 мм

Положение оптимальной точки внутри области приемлемых тепловых режимов определяется с учетом параметров стабильности применяемого сварочного оборудования и требуемых технико-экономических показателей.

Для оптимизации теплового режима многослойной сварки НЛС были сформулированы требования к термическому циклу для обеспечения высоких показателей ударной вязкости и сопротивляемости образованию ХТ. Каждое тепловое воздействие должно оказывать положительное влияние на нижерасположенные слои: сначала перекристаллизацию и измельчение зерна аустенита, и затем - высокий отпуск и релаксацию напряжений. Для достижения такого влияния толщина каждого очередного слоя должна выбираться таким образом, чтобы максимальная температура нагрева донной части нижележащего слоя превышала температуру аустенизации A_3 , но не превышала температуры начала интенсивного роста зерна. Температура всех последующих воздействий на эту зону не должна превышать A_1 . При этих условиях может быть достигнуто состояние, характеризующееся дисперсной структурой продуктов отпуска бейнитного типа, обладающих высокими прочностными и вязкими свойствами.

Желательный термический цикл наиболее просто реализуется при щелевой разделке кромок и схеме заполнения «один валик в слое», при которой параметры режима сварки практически не изменяются при переходе от слоя к слою. Как показали проведенные расчеты, для достижения желаемого эффекта

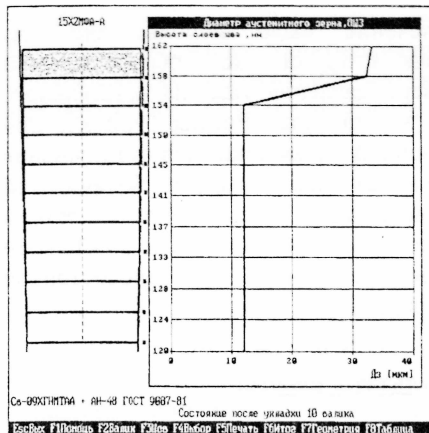


Рис. 12. Размер аустенитного зерна в ОШЗ стали 15Х2МФА

В данном расчете параметрами оптимизации являются концентрации основных легирующих элементов (C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo, V, Ti), вариация значений которых соответствует традиционным диапазонам легирования сварочных проволок перлитного класса. Интерактивная процедура синтеза начинается с выбора желаемой системы легирования проволоки (например, C-Mn-Cr-Ni), которая определяет динамически формируемое пространство управляемых параметров и систему прямых ограничений. Содержание в проволоке остальных легирующих элементов полагается равным их обычному металлургическому минимуму.

На каждом шаге поиска производится металлургический прогноз (расчет химического состава металла шва с учетом доли участия основного металла в шве и коэффициентов перехода легирующих элементов в шов из проволоки), и прогноз комплекса механических свойств металла шва.

Последним этапом является проверка устойчивости найденного решения при колебаниях входных параметров в пределах их естественного разброса. Решение признается устойчивым, если проверка методом анализа наихудшего случая не выводит его за пределы области качества. В противном случае необходима корректировка решения, либо (при узости области качества) уменьшение разброса параметров (за счет выбора сварочного оборудования, стабилизации параметров режима и т.п.).

Проведенные тестовые расчеты показали, что наиболее трудоемкой частью расчетов является оптимизация теплового режима сварки - на поиск решения требуется от 1 минуты (для однократной сварки) до 18-20 минут (для многослойной сварки) работы современной ПЭВМ.

высота наплавляемого за каждый проход слоя должна составлять $1/6 \dots 1/4$ от ширины щелевой разделки (рис. 12).

На втором этапе оптимизации при фиксированном тепловом режиме сварки обеспечиваются требуемые показатели свариваемости металла шва за счет выбора системы и степени легирования сварочной проволоки. Сначала проверяется возможность использования серийно выпускаемых проволок, химические составы которых хранятся в базе данных. При наличии приемлемых вариантов выбирается проволока, которая обеспечивает максимальную степень выполнения ТТ, предъявляемых к металлу шва; в противном случае производится расчет требуемого состава проволоки.

Разработанное программное обеспечение было использовано для обоснования необходимости послесварочной термической обработки при ремонте коллектора стабилизации и замера давления газа нагнетательного патрубка ГПА №4 КС «Краснодарская» газопровода «Россия-Турция»; при назначении режимов наплавки и наплавочной проволоки для обеспечения заданных свойств наплавленного слоя (без последующей термической обработки) при восстановлении изношенных поверхностей зубьев крупногабаритной звездочки цепного транспортера из стали 35Л; при разработке шихты керамического магнитного флюса для износостойкой наплавки шеек коленчатого вала автомобиля ЗИЛ-130.

Общие выводы и результаты работы

1. Высокая трудоемкость проектирования технологических процессов многослойной сварки и недостаточное использование ее потенциальных возможностей по обеспечению свариваемости низколегированных сталей в значительной мере объясняются сложностью и большим числом взаимосвязанных процессов, протекающих в сталях при многослойной сварке, их влиянием на комплекс показателей качества сварного изделия, неоднозначной зависимостью показателей качества от параметров технологии сварки. Совершенно очевидно, что только использование технических возможностей современной компьютерной техники для комплексного анализа технологических вариантов сварки путем моделирования совокупности протекающих в металле взаимосвязанных процессов, позволит получать оптимальные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки.

2. Основной проблемой имитационного моделирования физических процессов в сталях при сварке является сложность получения надежных данных о свойствах материала, которые являются структурно-зависимыми и непрерывно изменяются в процессе термдеформационного воздействия сварки. Для решения этой проблемы использовано представление материала совокупностью его структурных составляющих, позволяющее прогнозировать свойство материала через их соотношение и свойства. Для структурных составляющих НЛС проведена формализация теплофизических и механических свойств, основанная на учете химического состава и фактора температуры.

3. Для прогнозирования структурного состава стали в условиях сложного термического цикла многослойной сварки использован универсальный подход, основанный на решении системы уравнений математической физики, описывающих кинетику протекания полиморфных превращений. Разработана процедура определения кинетических коэффициентов, входящих в уравнения превращений, из диаграммы превращений материала путем решения обратной задачи.

4. Разработана методика учета температурно-временного фактора, основанная на анализе кинетики формирования показателя сопротивляемости и растягивающих напряжений, что позволяет прогнозировать вероятность и ожидаемый момент появления очага холодной трещины в сварном соединении.

5. Разработана комплексная математическая модель формирования показателей свариваемости НЛС на основе современных представлений об их взаимосвязи с физическими процессами, протекающими в металле при многослойной сварке.

6. Разработана система компьютерного анализа свариваемости НЛС, включающая в себя исследовательскую часть на базе конечноэлементного программного комплекса «СВАРКА», и инженерный программный комплекс «Свариваемость легированных сталей» для оперативного анализа технологических вариантов многослойной сварки. Комплекс используется в НИР и учебном процессе МГТУ им.Н.Э.Баумана, МЭИ, МИИТ, ГАНГ им.И.М.Губкина, ПГТУ (Пермь), ДГТУ (Ростов), ТолПИ (Тольятти).

7. Сформулированы требования к термическому циклу многослойной сварки НЛС для обеспечения высоких показателей ударной вязкости и сопротивляемости образованию ХТ. Каждое тепловое воздействие должно оказывать положительное влияние на нижерасположенные слои: сначала перекристаллизацию и измельчение зерна аустенита, и затем - высокий отпуск и релаксацию напряжений. Для достижения такого влияния толщина каждого очередного слоя должна выбираться таким образом, чтобы максимальная температура нагрева донной части нижележащего слоя превышала температуру аустенизации A_3 , но не превышала температуры начала интенсивного роста зерна. Температура всех последующих воздействий на эту зону не должна превышать A_1 . При этих условиях может быть достигнуто состояние, характеризующееся дисперсной структурой продуктов отпуска бейнитного типа, обладающих высокими прочностными и вязкими свойствами.

8. Определена стратегия оптимизации параметров технологии сварки низколегированных сталей, состоящая из двух этапов. На первом этапе необходимо обеспечить достижение требуемых показателей свариваемости основного металла за счет выбора параметров режима и подогрева. На втором этапе при фиксированном тепловом режиме сварки необходимо обеспечить требуемые показатели свариваемости металла шва за счет выбора системы и степени легирования сварочной проволоки. Разработаны программы для оптимизации технологии однопроходной и многослойной сварки НЛС, предназначенные для использования на стадии технологической подготовки.

Основное содержание работы отражено в публикациях:

1. Коновалов А.В., Маслова Е.Б., Рыбачук А.М. Расчет на ЭВМ режима дуговой сварки стыковых соединений с разделкой кромок // Известия ВУЗов. Машиностроение. - №3.- 1989.- С. 23-28.

2. 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. ВНТК, г. Тверь.- М.:Изд-во МГТУ,1991.- С. 60-61.

3. Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Назначение сварочных материалов и режима сварки высокопрочных сталей с помощью компьютера // Производство и надежность сварных конструкций: Тез.докл НТК стран СНГ, 26-28 января 1993г., г.Калининград (Мо).- М., 1993.- С. 97.

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

5. Makarov E., Konovalov A. Computer Analysis of Alloyed Steels Weldability // Proc. 5th International Conference on Computer Technology in Welding. Paris, 1994.- Paper 48.

6. Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Система компьютерного анализа свариваемости и технологии сварки конструкционных легированных сталей // Сварочное производство.- 1995.- N3.- С. 6-9.

7. Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Математические модели и компьютерные программы для расчета показателей свариваемости // САПР и ЭС в сварке.- Тула, 1995.- С.43-50. (Известия ТулГУ)

8. Makarov E., Konovalov A. A system for computer analysis of the weldability and the welding technology for alloy steels // Welding International.- 1995.- N9 (10).- P.818-821.

9. Makarov E., Konovalov A. The Software Package for Analysis of Weldability and Welding Technology of Alloyed Steels // Math. Modelling of Weld Phenomena 3 / Eds.H.Cerjak, H.K.D.H.Bhadeshia, London: Institute of Materials, 1996.- Book 650.- P.68-78.

10. Расчетный метод оценки стойкости сварных соединений сплавов против образования горячих трещин / А.В.Коновалов, Э.Л.Макаров, Б.Ф.Якушин, А.А.Пшенников // Сварочное производство.- 1997.- №11.- С. 13-16.

11. Makarov E., Konovalov A., Jakushin B., Pshennikov A. A method of calculating the hot cracking resistance of welded joints // Welding International.- 1998.-N12 (5) P.390-393.

12. Компьютерные технологии в сварке / А.В. Коновалов, Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин, А.П. Выборнов // Экономика промышленности.- 1999.- № 3 -С.3-6.

13. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учебное пособие для вузов / С.А.Куркин, В.М.Ховов, Ю.Н.Аксенов и др.; Под ред. С.А.Куркина, В.М.Ховова.- М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002.-464 с.

14. Коновалов А.В. Проектирование оптимальных процессов многослойной дуговой сварки сталей // Сварка на рубеже веков: Тезисы докладов ВНТК- М., 2002.- 136с

15. Коновалов А.В., Макаров Э.Л. Моделирование структурных превращений сталей в процессе многослойной сварки и термообработки // Сварка на рубеже веков: Тезисы докладов ВНТК. - М., 2002.- 136с