

1566469

На правах рукописи

Киселев Алексей Сергеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СВАРОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОДЕФОРМИРОВАННОГО И
СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Специальность 05.03.06 Технология и машины сварочного производства

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук

Ки

Москва - 2000

Работа выполнена в Российском Научном Центре "Курчатовский институт".

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук

Григорьянц А.Г.

профессор, доктор технических наук

Прохоров Н.Н.

профессор, доктор технических наук

Казанцев А.Г.

Ведущее предприятие –

**Институт проблем безопасного развития атом-
ной энергетики (ИБРАЭ) РАН**

Защита состоится "25" МАЯ 2000 г. в 14.30

на заседании диссертационного Совета Д053.15.07 при Московском
Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005,
г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

библиотеке МГТУ имени Н.Э.Баумана.

...ать, просим выслать по

2000 г.

А.В.Коновалов

1566469

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1566469

Киселев А.С. Разработка ме

1,5

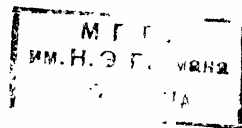
Тираж 100 экз.

фия МГТУ имени Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1586469

Актуальность проблемы. Процессы сварки, высокотемпературной резки, наплавки, термообработки широко используются при создании ответственных конструкций. К ним можно отнести корпуса и элементы оборудования атомных станций, трубопроводы во всех отраслях промышленности, конструктивные элементы транспорта и многое другое. Без применения процессов сварки изготовление большинства перечисленных конструкций было бы практически невозможно. Вместе с этим использование процессов сварки и наплавки приводит к возникновению ряда проблем, связанных с неоднородностью сварных соединений. Возникновение неоднородности обусловлено сложными физикохимическими и термдеформационными процессами протекающими при сварке и наплавке. Влияние этих процессов на качество сварных конструкций многообразно. Оно выражается в изменении механических свойств и химического состава металла в зоне технологического влияния, в возникновении упругих и пластических деформаций и высоких временных и остаточных напряжений, в появлении специфических для сварных соединений форм концентраторов напряжений и деформаций. При определенных условиях сочетание отрицательных факторов может привести к разрушению конструкции уже на стадии изготовления или к появлению крупного дефекта, исключающего последующую эксплуатацию. Для обоснованного принятия решения о несущей способности конструкции при наличии неоднородности или дефектов необходимо применять современные расчетные и экспериментальные методы, прежде всего для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС). Возможности экспериментального определения временных и остаточных напряжений и деформаций при наличии в объекте сложного трехмерного НДС ограничены. Во многих случаях они связаны с повреждением конструкции, что недопустимо для сложных, дорогостоящих или действующих изделий. Применение неразрушающих методов измерений позволяет определять остаточные деформации и напряжения на поверхности деталей на удалении от зон высокого нагрева, хотя во многих случаях наиболее опасные зоны сварных соединений находятся в глубине металла. Экспериментальные методы дают достоверную, но неполную информацию (в



малом числе точек), кроме этого они часто не позволяют выявить влияние отдельных факторов процесса сварки на кинетику НДС. Поэтому наиболее перспективными для прогнозирования несущей способности сварных конструкций с учетом всех их особенностей можно считать современные методы компьютерного моделирования, а экспериментальные использовать для их верификации и определения исходных данных.

Разработке расчетных методов изучения сварочных процессов, оценки прочности и НДС сварных конструкций посвящены работы многих российских и зарубежных ученых. Следует отметить труды наиболее известных исследователей Е.О.Патона, Г.А.Николаева, Н.О.Окерблома, Н.Н.Рыкалина, С.А.Куркина, О.А.Бакши, Н.Н.Прохорова, В.А.Винокурова, А.Г.Григорьянца, Г.П.Карзова, Э.Л.Макарова, В.И.Махненко, В.Ф.Демченко, Р.З.Шрона, Л.А.Копельмана, А.А.Углова, В.И.Труфякова, В.М.Сагалевица, В.Ф.Лукьянова, С.Н.Киселева, Н.Никол. Прохорова, В.А.Судника, А.С.Зубченко, В.А.Кархина, Б.З.Марголина, А.С.Куркина, В.В.Аладинского, Yamada Y., Yoshimura N. и др. Одним из важных результатов их работы и переходящих из поколения в поколение знаний и опыта стало создание в последние десятилетия ряда программных комплексов на основе современных численных методов. Их применение позволило весьма подробно изучать термомеханическое поведение сварных конструкций, вводя все более и более совершенные физические и математические модели. Однако некоторые существенные проблемы моделирования к настоящему времени не решены.

Математическое моделирование процессов, происходящих при сварке, наплавке, термообработке должно проводиться на базе решения трех основных задач:

- нелинейной нестационарной задачи теплопроводности;
- задачи структурообразования;
- термомеханической задачи в упругопластической постановке.

Решение перечисленных задач осложняется необходимостью учета зависимости теплофизических и механических свойств материала от температуры и структуры, которые меняются в очень широких пределах. На точность результатов решения температурно-структурной и механической задач оказывает существенное влияние учет скрытой теплоты структурных и фазовых превращений, скорости охлаждения различных

точек модели и максимальной температуры их нагрева, различный структурный состав в каждой точке модели.

Можно отметить недостаточное развитие методов компьютерного моделирования процессов структурных и фазовых превращений применительно к сварным конструкциям, хотя они имеют существенное значение для проведения корректной оценки работоспособности сварных конструкций.

Ряд проблем имеется также в направлении оценки технологической прочности сварных конструкций в высокотемпературной области. Они связаны с отсутствием методики переноса критериев технологической прочности, получаемых на пробах, на реальные изделия. Развитие методов компьютерного моделирования в этой области является перспективным.

Применяя численные методы, исследователи обычно пытаются свести схему решения задачи к двумерной: осесимметричной, плоского напряжения, плоской деформации, плоского слоя. Это связано с большим ростом (в сотни и тысячи раз) затрат вычислительных ресурсов при использовании объемной схемы решения, которая наиболее полно соответствует реальному процессу, что делает возможным решение сварочных задач в трехмерной постановке лишь с применением суперкомпьютеров. При переходе к двумерным схемам вводят упрощающие допущения, например, об одновременной укладке шва и быстро движущихся источниках теплоты или о постоянстве температуры или ее градиента по толщине изделия и т.п. Несмотря на то, что они существенно ограничивают круг конструкций и режимов сварки, для которых может быть проведено расчетное исследование, на основе двумерных моделей получены решения для ряда важных практических задач. Однако в каждом конкретном случае такие допущения, как «быстро движущийся источник теплоты», «тонкая» или «толстая» пластина, «короткий» или «длинный» шов и др. требуют количественной оценки. Все указанные ограничения снимаются при переходе к трехмерным моделям. Необходимо подчеркнуть, что большинство задач коробления конструкций при сварке, моделирования деформационных процессов вблизи сварочной ванны при сложной форме проплавления, а также при исследовании изделий сложной трехмерной геометрии либо простой геометрии, но при местном ме-

ханическом и термическом воздействии, принципиально не могут быть решены в двумерной постановке. Поэтому разработка методик трехмерного моделирования для исследования рассматриваемых проблем представляется перспективной.

Таким образом, развитие методов компьютерного моделирования при проектировании технологических процессов сварки в двухмерной и трехмерной постановке с уточнением физической модели материала представляется актуальным.

Целью диссертационной работы является разработка методов компьютерного анализа сварочных технологий, обеспечивающих обоснованный выбор конструктивно-технологических решений, направленных на повышение работоспособности сварных конструкций.

Методы исследования: Моделирование термдеформационных процессов в конструкциях проведено численными методами элементарных тепловых балансов, конечных элементов и суперэлементов с учетом физической нелинейности с помощью специально разработанных программных комплексов. При экспериментальных исследованиях использованы методы тензометрирования, магнитоупругий, лазерной интерферометрии. Для получения дилатометрических характеристик и построения диаграмм анизотермического распада аустенита использовался компьютерный анализатор материалов КАМАТ-ГАНГ.

Научная новизна работы:

1. Сформулирована концепция, заключающаяся в том, что развитие расчетных методов анализа и проектирования сварочной технологии необходимо проводить в следующих направлениях:

а) совершенствования методов моделирования кинетики структурных превращений при сварке для оценки структурного состояния сварных конструкций;

б) совершенствования физической модели материала в расчетах тепловых и деформационных процессов, учитывающая возможное наличие различных структурных составляющих или их смесей в каждой точке модели для уточнения результатов расчета;

в) разработки методов трехмерного моделирования термдеформационных процессов при сварке, снимающих ограничения, присущие двумерным моделям, на типы конструкций и режимы технологических процессов.

Разработана специализированная методика, позволяющая моделировать кинетику структурных превращений в изделиях при сварочном технологическом воздействии с использованием термокинетических диаграмм металлов, а также решать термомеханические задачи в трехмерной постановке на стандартных персональных компьютерах с использованием суперэлементного подхода и физической модели материала, учитывающей возможное наличие различных структурных составляющих и их смесей в каждой точке модели.

2. Установлено, что для оценки стойкости сварных соединений против горячих трещин (ГТ), в зависимости от зоны их образования, целесообразно использовать следующие деформационные критерии: для сварного шва наиболее информативными являются компоненты собственных деформаций, накапливаемых в температурном интервале хрупкости, ориентированные вдоль и поперек оси шва, в околошовной зоне – интенсивность пластических деформаций, накопленных в температурном интервале хрупкости (ТИХ). На базе этих критериев разработана расчетно-экспериментальная методика, позволяющая получить количественные данные для перехода от оценки стойкости материалов против ГТ на пробах к оценке технологической прочности реальных сварных конструкций.

3. На основании решения задачи о проплавлении тонких листов в трехмерной постановке для источника теплоты, движущегося с конечной скоростью, установлено, что причиной изменения величины и знака временного и остаточного прогибов пластин при постоянном режиме сварки и способе закрепления являются малые, в пределах толщины листа, начальные отклонения от плоской формы. При наличии начального прогиба «вверх» (с приближением к сварочному источнику) перемещения кромки пластины из плоскости на стадии сварки имеют синусоидальный, со сменой знака характер, а на стадии остывания непрерывно возрастают. При наличии начального прогиба «вниз» эти перемещения на стадии сварки монотонно возрастают, а на стадии остывания – убывают. Остаточные значения прогиба существенно ниже, чем в первом случае. При наличии начального «скручивания» листового элемента в процессе сварки и остывания форма пластины изменяется в сторону увеличения начального отклонения.

4. Применение гипотезы об одновременной укладке шва и решение задачи о расчете *напряжений* при сварке кольцевых швов труб в осесимметричной постановке дает погрешность по значениям максимальных напряжений в сварном шве не более 5% по сравнению с решением в трехмерной постановке во всем диапазоне рассмотренных скоростей сварки (0.2 – 1.2 см/с). В зоне, прилегающей к шву, погрешность расчета окружных (продольных) напряжений может достигать 50%, однако она идет в запас прочности. Исследование процесса пространственного деформирования труб при сварке можно проводить только в трехмерной постановке.

5. Расчетным путем показано, что при электронно-лучевой сварке труб из никелевого сплава наличие сложной формы проплавления в сочетании с низкой теплопроводностью и высокой жаропрочностью обуславливает высокий уровень накопления растягивающих деформаций в ТИХ в направлении толщины стенки трубы в околошовной зоне, что является причиной образования ГТ. С увеличением толщины труб (в диапазоне 6-27 мм) накопленная в ТИХ деформация имеет максимум при толщине 18 мм. При увеличении погонной энергии сварки максимум деформации, накопленной в ТИХ, смещается из «подгрибковой» зоны в середину шва. С увеличением скорости сварки величина этого критерия возрастает, что означает увеличение вероятности образования ГТ.

Практическая ценность и результаты работы:

1. Совместно с проф. д.т.н Куркиным А.С. (кафедра сварки МГТУ им. Н.Э.Баумана) разработан программный комплекс “Сварка”, обеспечивающий моделирование напряженно-деформированного состояния и оценку статической прочности в процессе изготовления и эксплуатации сварных конструкций на основе метода конечных элементов. Комплекс передан для использования в ряд организаций Москвы, Свердловска, Краматорска, Ростова-на-Дону и Волгодонска.

2. Для моделирования кинетики НДС при сварке и сопутствующих технологических процессах в трехмерной постановке совместно с Киселевым Александром Сергеевичем (РНИЦ «Курчатовский институт») разработан программный комплекс “WELD3D”

3. Проведен численный анализ ряда изделий при различных сочетаниях конструктивно-технологических параметров процессов изготов-

ления и эксплуатации. Обоснованы рекомендации по выбору рациональных режимов технологических процессов.

4. На основе проведенных исследований внесены изменения в нормативную документацию на изготовление, поставку и ремонт наплавкой ЦКК вагонов. Разработан проект «Технических условий на поставку цельнокатаных колес для скоростного движения». Выпущено «Извещение об изменении ТУ 0941-044-01124328-96; Бандажи черновые из непрерывнолитой заготовки углеродистой стали для подвижного состава железных дорог широкой колеи». Изменение утверждено ГОССТАНДАР-Том РФ и внесено РЕЕСТР за номером 200\013675\01. Дан ряд конкретных рекомендаций по корректировке технологии изготовления цельнокатаных колес. Соответствующие документы приложены к диссертации.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- Методика анализа термодеструкционных процессов и структурных превращений при сварке, наплавке и термообработке (ТО) на основе разработанных алгоритмов расчета температурно-структурных полей с учетом термокинетических диаграмм и расчета НДС сварных конструкций с использованием уточненной физической модели материала, учитывающей возможное наличие смеси структур в каждой точке модели;

- Методика расчета НДС сварных соединений в трехмерной постановке на основе метода суперэлементов;

- Расчетно-экспериментальная методика оценки склонности к образованию горячих трещин материалов и изделий с учетом технологических и конструктивных факторов на основе расчетного определения и сопоставления деформаций, накапливаемых в температурном интервале хрупкости, в пробах и реальных изделиях;

- Результаты анализа термодеструкционных процессов и структурных превращений при термообработке, наплавке и эксплуатационных воздействиях на цельнокатаные колеса железнодорожного транспорта;

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и получили положительную оценку в 1996-2000 г.г. на семинаре кафедры сварки МГТУ им. Н.Э.Баумана, на международных конференциях “Защита - 98” в ГАНГ им. Губкина; “ТЕМПТ-97”, София, 1997г.; на 2 и 3 конференциях “Безопасность трубопроводов”, Москва, 1997 г., 1999 г.; на “4-th International conference on railway bogies and running gears”, Бу-

лапешт, 1998г. и др. Программный комплекс “Сварка” передан для использования в ряд организаций: ПО Атоммаш, ПО НКМЗ, НПО ЦНИИТМАШ, НПО им. Лавочкина, НИКИЭТ, ЦНИИМ, ВНИИВ, МИИТ, ДГТУ, МИФИ и др.

Научные исследования по теме диссертационной работы проведены в рамках плана фундаментальных исследований Российского Научного Центра «Курчатовский институт», международной программы по оценке прочности корпусов реакторов «FALSIRE», проекта №774 Международного Научно-технического Центра, плана основных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ МПС РФ, а также межвузовских программ “Сварочные процессы” на 1992-99г.г.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка использованных литературных источников. Изложена на 317 страницах машинописного текста, содержит 150 рисунков, 21 таблицу и 164 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ состояния вопроса.

При высокотемпературных технологических операциях в изделии протекает комплекс связанных и согласованных процессов: интенсивный нагрев и охлаждение металла, его плавление и кристаллизация, структурные и фазовые превращения, неизотермическое деформирование, насыщение газами и других. Это является причиной того, что сварные конструкции считаются одними из самых сложных объектов для численного анализа. Выделены основные особенности сварных конструкций: сложность и разнообразие геометрических форм; неоднородность свойств материала; наличие зон концентрации деформаций и напряжений; разброс значений теплофизических и механических свойств; наличие остаточных напряжений; возможность образования горячих и холодных трещин.

На основании проведенного анализа установлено следующее:

1. Оценка прочности и работоспособности конструкций, изготовленных с применением сварки, наплавки, термообработки и других видов термомеханического воздействия должна производиться с учетом всех этапов изготовления и эксплуатации.

2. Для адекватного компьютерного моделирования сварочных и сопутствующих процессов необходим учет в физической модели материала различных структурных составляющих, обладающих специфическими свойствами, зависящими от температуры. Разработанные к настоящему времени упрощенные алгоритмы моделирования процессов структурообразования при сварке требуют совершенствования для распространения их на реальные сварные конструкции.

3. Недостаточно разработаны методы компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния сварных конструкций в трехмерной постановке. Наряду с методом конечных элементов (МКЭ) наиболее подходящей основой для их развития представляется численный метод суперэлементов, являющийся надстройкой к методу конечных элементов и позволяющий сократить объем вычислений особенно при наличии в конструкции повторяющихся частей. Поскольку при моделировании процесса сварки приходится рассматривать процесс укладки протяженного шва, в большинстве сварных соединений такая повторяемость присутствует. Поэтому применение метода суперэлементов для моделирования термдеформационных технологических процессов при сварке и наплавке весьма перспективно.

4. Главной причиной, затрудняющей обоснование выбора способа и режима сварки реальной конструкции по критериям технологической прочности, является разрыв между экспериментальным определением количественных значений этих критериев и возможностью их переноса на изделие.

Таким образом, анализ состояния вопроса позволил сделать вывод об актуальности постановки исследований и сформулировать задачи диссертационной работы:

1. Разработка методики анализа термических, структурных и деформационных процессов при сварке, термообработке и наплавке с использованием усовершенствованной физической модели материала, учитывающей наличие смеси структур в каждой точке тела;

2. Разработка методики расчета НДС сварных соединений на основе метода суперэлементов, позволяющей производить моделирование в трехмерной постановке на стандартных персональных компьютерах, необходимой для анализа ранее неисследованных зон сварных соединений,

пространственного деформирования сварных конструкций, воздействия местных механических и термических нагрузок и др.;

3. Разработка программного обеспечения для анализа сварочных и сопутствующих процессов в двумерной и трехмерной постановках.

4. Разработка методики оценки стойкости против образования горячих трещин материалов и изделий с учетом технологических и конструктивных факторов на основе использования деформационных критериев;

5. Разработка методики анализа кинетики НДС, а также структурных и фазовых превращений в сварных конструкциях при последовательном воздействии сварки, термообработки и эксплуатационных нагрузок;

6. Проведение анализа термдеформационных процессов и структурообразования для различных конструкций и технологий сварки, разработка и внедрение рекомендаций по выбору рациональных конструктивно-технологических решений, повышающих работоспособность изделий.

Глава 2. Развитие методов решения нелинейных задач теплопроводности и термоупругопластичности применительно к процессам сварки, наплавки и термообработки.

В данной главе разрабатывается комплекс методик и алгоритмов для решения поставленных задач на базе численных методов.

1. Разработана методика решения нелинейных задач нестационарной теплопроводности с учетом структурных превращений при сварке и наплавке на основе применения метода элементарных тепловых балансов (МЭБ) и явной схемы решения по времени, основанного на законе сохранения энергии и являющегося разновидностью метода конечных элементов.

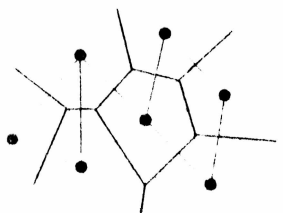


Рис.1. Плоскость, разбитая на ячейки Вороного

Согласно этому методу тело дискретизируется на элементарные объемы, отделенные некоторыми границами друг от друга и от внешней среды. Алгоритм решения состоит в определении потоков тепла через все границы, окружающие элементарные объемы, в соответствии с градиентами температур и значениями теплофизических

свойств материала по закону Фурье, а затем – в вычислении изменения температур в центрах элементов. Использовались элементы типа ячеек Вороного (рис.1), которые строятся так, что центры элементов совпадают с точками, в которых определяется температура, а каждая граница перпендикулярна к линии, соединяющей центры соседних ячеек и делит эту линию пополам. Вследствие этого каждая точка границы равноудалена от центров двух разделяемых ею элементов. Ячейки Вороного представляют собой выпуклые многогранники (в плоском случае - многоугольники). Вершина многогранника равноудалена от центров всех сходящихся в ней элементов. Использование МЭБ позволило разработать алгоритм расчета тепловых полей, не зависящий от размерности тела (объемное, плоское или осесимметричное распределение тепла), т.к. для решения достаточно иметь информацию только о площадях границ и объемах элементов, которые вычисляются на стадии построения модели. Разработанный совместно с Куркиным А.С. алгоритм разбиения на ячейки Вороного позволяет построить эффективную разбивку для расчета температурных полей на основе произвольной сетки конечных элементов и рассчитывать температуры непосредственно в тех точках, в которых они нужны для последующего расчета НДС.

Алгоритм МЭБ усовершенствован в связи с уточнением физической модели материала, учитывающей структурное состояние (в том числе и смеси структурных компонентов) в каждой точке изделия с соответствующими теплофизическими и механическими характеристиками, зависящими от температуры. Алгоритм расчета заключается в следующем. На произвольном шаге по времени сначала решается задача теплопроводности и определяется температурное поле в детали. При этом теплофизические характеристики соответствуют значениям температур и структурному состоянию в конце предыдущего шага. Для каждой точки дискретной модели на каждом шаге решения определяется ее положение на термокинетической диаграмме (ТКД). ТКД задается сеткой кривых охлаждения в виде таблиц с определенными на них точками начала и конца структурных превращений и данных о процентном соотношении структур. При помощи линейной интерполяции по этим таблицам в конце каждого шага решения для соответствующей температуры и времени определяются текущее структурное состояние в каждой точке мо-

дели тела, а также значения теплофизических характеристик в соответствии с объемным соотношением структурных составляющих и температурой. Эти значения используются на следующем шаге решения, в конце которого они опять корректируются.

Отдельной важной проблемой является моделирование сварочных источников теплоты. В диссертации разработаны четыре модели источников:

- Для сварки с присадочным металлом в разделку. По мере продвижения источника теплоты вдоль заданной траектории, последовательно заполняются элементы разделки металлом с температурой, соответствующей мощности и скорости сварки. Свойства присадочного металла могут отличаться от свойств основного, однако перемешивание основного и присадочного металла не учитывается. Желательно, чтобы размер элементов в направлении движения источника был не более половины длины сварочной ванны. Если это невозможно из-за размерности, прежде всего, деформационной задачи, необходимо рассчитывать температурные поля на более подробной разбивке и аппроксимировать их на модель для расчета деформаций. Для уменьшения влияния дискретности ввода порций тепла при переходе к следующим в направлении источника элементам разделки, модель источника теплоты включает специальные границы, отделяющие их от основного металла и учитывающие долю заполнения очередного элемента.

- Для сварки неплавящимся электродом без разделки. Плоский поверхностный источник теплоты движется вдоль заданной траектории в виде пятна заданного радиуса. Возможно задание различного распределения мощности в пятне нагрева. Поверхностные границы элементов 3 рода (теплоотдача в среду), попадающие в зону действия источника, становятся границами 2 рода (задан поток теплоты), а после выхода из зоны действия источника опять становятся границами 3 рода.

- Для электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Источник теплоты задается комбинацией двух плоских источников. Один из них моделирует непосредственное действия луча на свариваемые кромки по толщине детали, второй – на поверхности детали – моделирует нагрев детали расплавленным металлом, выдавленным из лучевого канала и действует с некоторым запаздыванием относительно первого. Возможно задание различного распределения мощности как в первом, так и во втором ис-

точнике, а также варьирование времени запаздывания. Поскольку градиенты температуры при ЭЛС очень высоки, требуется введение очень малых (~ 1 мм) элементов в направлении движения источника. Это делает необходимым применение специализированной методики расчета, когда источник теплоты неподвижен, а на каждом шаге решения происходит сдвиг температурного поля относительно модели в направлении, противоположном направлению движения луча. Данная методика идеально подходит для замкнутых швов. Алгоритм МЭБ претерпевает при этом лишь небольшие изменения.

- Универсальный эквивалентный источник теплоты для любого вида сварки плавлением при квазистационарном поле температур. Его размер и форма соответствуют сварочной ванне, а температура – температуре плавления материала изделия. Прослеживается его движение вдоль заданной траектории шва с заданной скоростью. Это одно из перспективных направлений, позволяющее объединить усилия ученых из разных областей сварочной науки.

2. Разработана методика решения нелинейных термоупругопластических задач применительно к сварочным процессам с учетом истории нагружения и возможного наличия смеси структур в точках модели на базе МКЭ с использованием квадратичных конечных элементов. Методика основана на использовании основных соотношений теории упругости, теории течения и условия перехода в пластическое состояние Хубера-Мизеса. Для линеаризации задачи в упругопластической области применялся итерационный процесс по методу упругих решений А.А.Ильюшина с постоянной упругой матрицей жесткости и процедура ускорения решения, предложенная В.В. Аладинским, основанная на минимизации квадратичной нормы ожидаемого приращения перемещений на очередной итерации с учетом результатов решений на предыдущих итерациях. Разработанная в диссертации методика отличается следующим: в случае наличия в точках тела смеси структур, если свойства (модули упругости, предел текучести, коэффициент линейного расширения и др.) для каждой структурной составляющей (например, аустенит, мартенсит, перлит, бейнит, троостит, сорбит для стали) известны, результирующие свойства смеси вычисляются по принципу аддитивности, пропорционально объему структурной составляющей и значению теку-

щей температуры. Информация о НДС и структурном состоянии может быть получена для любой точки модели сварного соединения на любом шаге решения.

3. Разработана методика моделирования термдеформационных процессов при сварке и других видах термомеханического и силового нагружения в трехмерной постановке на базе метода суперэлементов (МСЭ). Суть моделирования при использовании как МКЭ, так и МСЭ состоит в прослеживании на модели движения сварочного источника теплоты по свариваемым кромкам за некоторое число шагов решения и расчете тепловых, структурных полей и НДС при каждом дискретном положении источника. При использовании метода конечных элементов в перемещениях разрешающая система линейных алгебраических уравнений относительно вектора приращения узловых перемещений $\{\Delta\delta\}$ конечноэлементной модели имеет вид: $[K] \cdot \{\Delta\delta\} = \{\Delta P\}$, (1)

где $\{\Delta P\}$ - вектор приращения приведенных узловых нагрузок, $[K]$ - глобальная матрица жесткости конечноэлементной модели. При переходе к трехмерным моделям реальных конструкций число уравнений в системе (1) обычно составляет не менее 10000. При моделировании сварочных задач оно еще более возрастает, так как из-за высоких градиентов исследуемых величин в зоне технологического влияния необходимо использовать элементы малых размеров. Это создает существенные проблемы (часто практически непреодолимые) с размещением задачи в памяти компьютера. Поскольку задачи являются многошаговыми, актуальна также проблема, связанная с чрезмерным временем решения. Разрешить эти проблемы удалось путем разработки методики решения на базе метода суперэлементов (МСЭ), позволяющего поэтапно снизить размерность задачи. Суть МСЭ заключается в представлении конструкции в виде суперэлементов (СЭ), которые включают определенное количество обычных конечных элементов. На рис.2 приведен пример такого подхода для модели трубы. Специальные методы обработки определяющих матриц позволяют сократить размерность модели (количество неизвестных) за счет исключения из рассмотрения узлов элементов, находящихся внутри СЭ.

Для этого соотношение (1) записывается в виде:

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{iu} \\ K_{ui} & K_{uu} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_i \\ q_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_i \\ P_u \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где: i - индекс внутренних узловых параметров; s - индекс граничных узловых параметров; $\{q_i\}$ - вектор перемещений внутренних узлов; $\{q_s\}$ - вектор перемещений граничных узлов; $\{P_i\}$ - вектор нагрузок, приложенных к внутренним узлам; $\{P_s\}$ - вектор нагрузок, приложенных к граничным узлам;

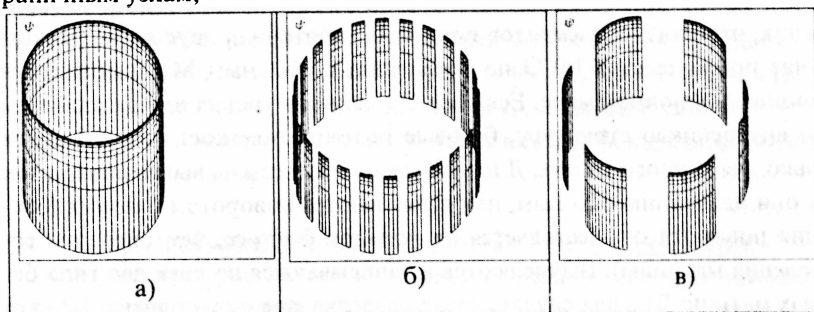


Рис.2 Модели трубы: конечноэлементная (а), суперэлементная модель первого уровня (б), суперэлементная модель второго уровня (в)

После математических преобразований в соответствии с формулами (3) – (5), можно получить зависимости для определения матрицы жесткости $[k]$ и вектора узловых усилий $\{P\}$ суперэлемента (СЭ), включающие только неизвестные на границах СЭ.

$$[k] = [K_u] - [K_u][K_u]^{-1}[K_u] = [F]^T [K][F], \quad (3)$$

$$\text{где } [F] = \begin{bmatrix} -[K_u]^{-1}[K_u] \\ [E] \end{bmatrix}, \quad [E] - \text{единичная матрица}, \quad (4)$$

$$\{P\} = \{P_s\} - [K_u][K_u]^{-1}\{P_i\} = [F]^T \{P\}, \quad (5)$$

где индекс (-1) означает обратную матрица, (Т) – транспонированную.

При этом размерность задачи значительно снижается, т.к. количество граничных узлов составляет обычно не более 20% от общего количества узлов. Для очень больших моделей возможно повторение этой процедуры, объединяя суперэлементы более низкого уровня в более крупные СЭ (рис.2в). Таким образом, решается проблема размещения задач в памяти компьютера. Важно подчеркнуть, что МСЭ является строгой математической процедурой и обеспечивает всестороннюю связь между СЭ

различных уровней. В отличие, например, от метода подконструкций, обеспечивающего переход от полной модели к ее мелким фрагментам с более подробной разбивкой, но без обратной связи.

При решении задач моделирования процессов сварки и наплавки обычно имеет место повторяемость дискретной модели в направлении перемещения сварочного источника теплоты, т.е. модель можно построить так, чтобы слои элементов полностью повторяли друг друга. В этом случае преимущества МСЭ по сравнению с обычным МКЭ можно использовать в полной мере. Если все СЭ данного уровня имеют одинаковую внутреннюю структуру, базовые матрицы жесткости вычисляются только для первого из них. Для остальных матрицы не вычисляются, так как они идентичны базовым, или вычисляются поворотом базовых (операция поворота осуществляется на порядок быстрее, чем операция составления матрицы). Вычисляются и записываются на диск два типа базовых матриц: В1 - для случая, когда разделка еще не заполнена, В2 - когда разделка заварена и остыла до температуры T^* . Ниже этой температуры свойства материала, такие как модуль упругости, коэффициент Пуассона, можно считать неизменными. В процессе продвижения сварочного источника по свариваемой кромке для элементов, находящихся перед источником, используются матрицы В1. Для элементов позади источника, остывших до температуры T^* используются матрицы В2. Для элементов, находящихся в зоне действия источника ($T > T^*$), матрицы составляются вновь.

Если полная повторяемость слоев элементов, объединенных в суперэлементы, отсутствует и нельзя использовать базовые матрицы, суперэлементный алгоритм все равно дает большие вычислительные преимущества. Рассматриваемые задачи являются многошаговыми, причем изменение матриц каждого СЭ из-за температурного воздействия и изменения механических свойств имеет место только на некотором небольшом числе шагов, когда СЭ находится в зоне влияния сварочного источника теплоты. Таким образом, существенная экономия времени счета и оперативной памяти ЭВМ достигается за счет того, что матрица жесткости конструкции на каждом шаге пересоставляется лишь частично, в то время как основная ее часть не изменяется и сохраняется на внешней памяти ЭВМ.

4. Разработана методика расчета НДС и структурного состояния конструкций при эксплуатационной нагрузке с учетом предварительного технологического воздействия, основанная на поэтапном моделировании этих процессов. Расчет каждого следующего этапа проводится с учетом НДС полученного на более ранних этапах. Предусмотрена возможность оперативного изменения модели изделия и переноса на нее предыдущих результатов решения в случае изменения геометрии изделия в эксплуатации в результате износа. Последний фактор может оказывать существенное влияние на распределение остаточных напряжений в изделии, если исчезающие в результате износа слои детали являлись зонами с высоким уровнем напряжений.

Глава 3. Разработка и верификация программного обеспечения.

Сформулированы общие принципы формирования программного комплекса для моделирования сварочных и сопутствующих процессов:

1. Универсальность по отношению к геометрии исследуемых изделий;
2. Универсальность в выборе моделей поведения материалов в не-изотермических условиях;
3. Наличие пре- и постпроцессора для подготовки данных и обработки результатов решения;
4. Интерактивный, диалоговый режим работы пользователя с программой;
5. Возможность поэтапного решения задачи (составление модели, задание граничных условий, непосредственное решение температурно-структурной и механической задачи, обработка результатов) с сохранением работы пользователя на каждом этапе;
6. Возможность работы программного обеспечения в многозадачном режиме в связи с большой длительностью решаемых задач;
7. Разработка программы в виде крупных, независимых друг от друга блоков в связи с очень большим (десятки тысяч операторов) объемом кода и необходимостью разделения труда среди коллектива авторов;
8. Наличие в составе программного комплекса экспертной системы оценки результатов расчета с учетом различных предельных состояний конструкций;

9. Наличие банков данных по свойствам материалов, типам сварных соединений и способов сварки;

В соответствии с этим принципами автором совместно с Куркиным А.С. и Киселевым Александром С. в период с 1985-1999 г.г. разработаны программные комплексы «СВАРКА» и «WELD3D», ориентированные на моделирование технологических процессов и оценку работоспособности сварных соединений как при изготовлении, так и в эксплуатации. Они являются эффективными средствами исследования процессов при сварке, наплавке и сопутствующих технологиях и реализует методы решения, изложенные в главе 2. Специализированный характер и применение современных, оригинальных, эффективных алгоритмов обеспечивают его конкурентоспособность среди подобных программных средств. ПК «WELD3D» создан для работы в операционных системах WINDOWS 95, и NT 4.0. Зарубежные пакеты такие, как ANSYS, ABAQUS и др., несмотря на объем и высокую стоимость, не обеспечивают решения всех проблем, связанных с анализом сварочных процессов и работоспособности сварных соединений. Это относится, в частности, к вопросам оценки технологической прочности и анализа структурного состояния. Вместе с этим ориентировка этих программ на широкий круг задач затрудняет для пользователя процесс их освоения и обучения. Отличительной особенностью ПК «WELD3D» является наличие в его составе библиотеки конструктивных элементов, в том числе и сварных соединений, составление трехмерных моделей для которых полностью автоматизировано.

Проведено всестороннее тестирование и верификация ПК «СВАРКА» и «WELD3D». Ниже приведены результаты решения некоторых задач, поставленных с целью верификации, которые также имеют самостоятельное практическое и научное значение.

1. Компьютерное моделирование термомодеформационных процессов при электродуговой сварке и проплавлении листовых элементов в трехмерной постановке с учетом неодновременности наложения шва. Получены новые закономерности образования временного и остаточного НДС стальных пластин в зависимости от наличия начальных отклонений от плоской формы. Расчетным образом показано и экспериментально подтверждено, что эти отклонения являются основной причиной большого разброса (вплоть до смены знака) данных измерения перемещений пластин (200х200х2 мм, сталь Ст20) из плоскости при их проплавлении.

лении. Пластины закреплялись в малой зоне на краю, а измерение перемещений производилось в двух точках на противоположном краю. На рис. 3 а) и б) представлены расчетные зависимости перемещений из плоскости точек пластины

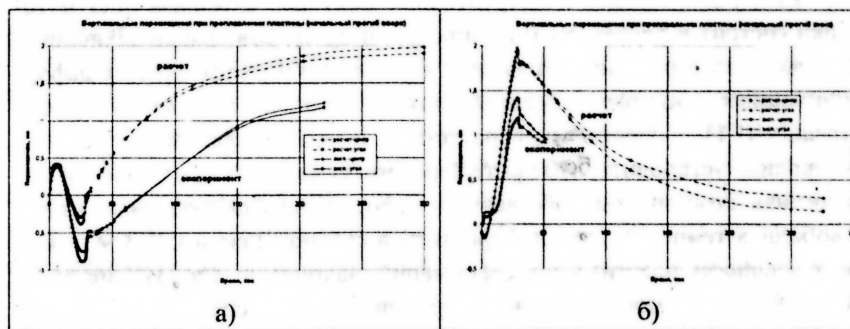


Рис. 3. Кинетика перемещений из плоскости краевых точек пластины при проплавлении: а) начальный прогиб 1 мм центра пластины вверх, б) – вниз

от времени при наличии малого начального прогиба в центре пластины различного знака. Можно отметить существенное различие этих закономерностей. Изучены также и другие начальные отклонения от плоскости по форме и величине. Приведенные результаты и методический подход могут быть использованы на практике, например, для минимизации коробления тонколистовых элементов при сварке или при изучении изменения сварочного зазора в процессе сварки.

2. Компьютерное моделирование термдеформационных процессов при электродуговой сварке труб встык в двух- и трехмерной постановке. Получены закономерности формирования временных и остаточных напряжений в сварных соединениях труб из стали Ст3. Проведена оценка применимости двумерной (осесимметричной) схемы решения с использованием гипотезы об одновременной укладке шва в зависимости от скорости сварки. Расчетным образом в трехмерной постановке исследованы закономерности накопления угловых деформаций при сварке кольцевых швов труб из нержавеющей стали 0Х18Н10Т и проведено сопоставление с экспериментом.

Глава 4. Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки технологической прочности сварных конструкций.

Разработана расчетно-экспериментальная методика оценки технологической прочности материалов и изделий в высокотемпературной области, учитывающая конструктивные факторы. Основная идея методики состоит в расчетном моделировании процессов сварки технологических проб и реальных изделий и вычислении в обоих случаях деформационных критериев, определяющих возможность появления горячих трещин (ГТ). Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволило установить, что критериями могут являться продольная и поперечная компоненты собственных деформаций (наблюдаемые минус свободная температурная деформация) в сварном шве и ОШЗ, а также интенсивность пластических деформаций, накопленных в ТИХ металла. По результатам моделирования сварки проб определяются критические значения этих параметров, поскольку известно, при каком сочетании технологических параметров начинают образовываться ГТ. Сравнение значений этих же деформационных параметров, рассчитанных при моделировании сварки изделия, с критическими позволяет уже на стадии проектирования процесса сделать вывод о возможном наличии или отсутствии ГТ в изделии. Основные преимущества расчетно-экспериментального подхода состоят в следующем:

а) При проведении экспериментов необходимо лишь зафиксировать факт наступления разрушения без проведения тонких измерений с использованием дорогостоящего оборудования. В результате эксперимент упрощается, ускоряется и становится дешевле.

б) Все сложные физико-химические явления, происходящие в шве и ОШЗ при кристаллизации и формировании шва и плохо поддающиеся моделированию, «берет на себя» образец при испытании, а их общее влияние интегрально учитывается в расчетном значении деформационного критерия, определяемого в зоне разрушения на модели образца.

в) Расчет моделей образцов ведется параллельно с экспериментальными исследованиями, что позволяет проводить тестирование моделей.

г) Возможно исследование технологического процесса сварки изделий на стадии проектирования, что позволяет избежать затрат на их производство, связанных с пересмотром технологии и порчей заготовок в случае возникновения горячих трещин.

Для получения корректных результатов и правильного прогнозирования уровня технологической прочности изделий на основе предлагаемой расчетно-экспериментальной методики в изделии и на образцах должны полностью соответствовать факторы, влияющие на формирование шва. К ним относятся: материал, толщина изделия, способ сварки, режимы сварки.

Апробация методики проведена на примере моделирования испытаний проб ЛТП МВТУ толщиной 3 мм из стали СтЗсп и алюминиевого сплава АД1 для оценки их склонности к образованию горячих трещин. Пробы ЛТП (рис.3а) представляют собой пластины (поз.1) переменной ширины с надрезом, от которого начинается их проплавление сварочным источником теплоты (поз.3). В результате сварочного нагрева их края расходятся (поз.2). Для узких пластин этот процесс идет более интенсивно, и образуются ГТ. При увеличении ширины пластин расхождение краев уменьшается и, при некоторой критической ширине, прекращается образование ГТ. Критическая ширина изменяется для различных режимов сварки. Моделируя этот процесс и вычисляя значения поперечной деформации в зоне начала разрушения (вершине надреза), находим критическое значение поперечной деформации для различных режимов сварки.

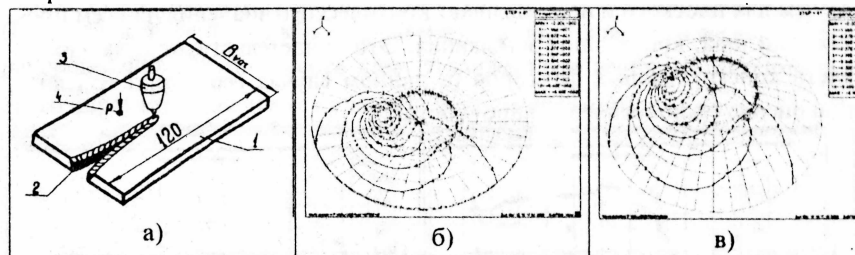


Рис. 4. Проба ЛТП (а), круглая заглушка в плоском теле (б), круглая заглушка в сфере (в)

Далее моделировали сварку изделий. В качестве изделий рассматривались: плоская (рис.3б) и сферическая (рис.3в) детали с ввариваемой круглой заглушкой диаметром 70 мм из сплава АД1. Прослеживался процесс укладки шва в трехмерной постановке (один из промежуточных этапов показан на рис. 3б и 3в) и вычислялись значения накопленной в

ТИХ поперечной $\epsilon_{\text{поп}}^{\text{ТИХ}}$ и продольной деформации $\epsilon_{\text{пр}}^{\text{ТИХ}}$. Были рассмотрены три варианта сварки плоского тела для скоростей сварки 6, 18 и 72 м/ч и один вариант - сферического для скорости сварки 18 м/ч. Экспериментальные исследования с круговыми пробами из алюминиевых сплавов, проведенные Якушиным Б.Ф., показали, что при малых скоростях сварки 4-20 м/ч происходило возникновение горячих трещин вдоль шва (от поперечных деформаций). При скоростях сварки более 80 м/ч образовывались горячие трещины поперек шва (от продольных деформаций). Практически во всех экспериментах наблюдалось образование трещин в области замыкания шва, что объясняется затруднением процесса усадки в этой зоне. Эти закономерности подтверждены и результатами расчета. Максимальные значения $\epsilon_{\text{поп}}^{\text{ТИХ}}$ наблюдаются для второй половины шва плоского изделия при $V_{\text{св}} = 6$ м/ч (рис. 5а, график 2). При $V_{\text{св}} = 18$ м/ч значения $\epsilon_{\text{поп}}^{\text{ТИХ}}$ снижаются (рис. 5а, график 3), однако на последней четверти шва и в замыкающей зоне превышают критическую величину 0.003, полученную для этой скорости сварки при моделировании проб (прямая 1). Это означает, что в этой зоне для рассматриваемого режима сварки велика вероятность образования в шве продольных ГТ. Для сферического изделия при $V_{\text{св}} = 18$ м/ч значения $\epsilon_{\text{поп}}^{\text{ТИХ}}$ значительно ниже (рис. 5а, график 4), чем для плоского и не превышает критического значения на всем протяжении шва, кроме зоны замыкания. Это свидетельствует о важности учета конструктивных факторов (в данном случае геометрии изделия) при оценке технологической прочности.

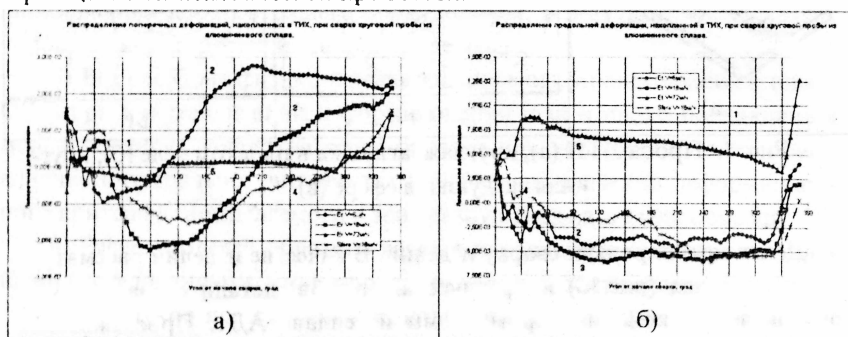
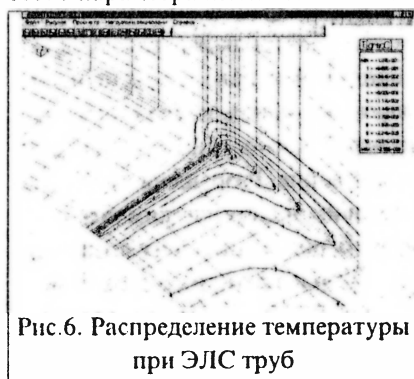


Рис. 5. Распределение поперечных (а) и продольных (б) деформаций накопленных в ТИХ вдоль шва

Для плоского тела и $V_{св} = 72$ м/ч значения $\epsilon_{\text{пол}}^{\text{ТИХ}}$ (рис.5а, график 5) малы и не превышают критического значения, равного 0.0077, для данного режима. Распределение продольной деформации (рис. 5б) показывает, что их максимальный уровень возникает при $V_{св} = 72$ м/ч (график 5), но не превышает критического значения (прямая 1), хотя и близок к нему. При увеличении скорости сварки возможно превышение критического уровня и появление поперечных ГТ.

Таким образом, хорошее соответствие расчетных результатов и экспериментальных данных доказывает работоспособность предлагаемой расчетно-экспериментальной методики оценки опасности возникновения ГТ в изделиях с учетом конструктивных факторов.

На основе изложенных научно-методических разработок, а также программного обеспечения было проведено компьютерное моделирование процесса электроннолучевой сварки труб из никелевого сплава ХН70ВМТЮ с целью исследования влияния параметров сварочного процесса на образование горячих трещин. Проведено исследование влияния режимов ЭЛС, толщины стенки труб (от 6 до 27 мм), условий закрепления заготовок и формы проплавления на величину интенсивности пластических деформаций $\epsilon_{\text{пл}}^{\text{ТИХ}}$, накопленных в ТИХ. На рис.6 приведено распределение температур при трехмерном моделировании ЭЛС (Режим: $I=0.16$ А, $U=35$ кВт, $V_{св}=10$ м/ч). На рис.7 для этого же варианта распределение $\epsilon_{\text{пл}}^{\text{ТИХ}}$ по высоте шва. Положение и величина максимума этого параметра изменяется в зависимости от параметров режима.



При сопоставлении с экспериментальными данными установлено, что в зонах максимума возникают горячие трещины. Даны рекомендации по выбору режима ЭЛС и форме зоны проплавления, обеспечивающих минимальные значения указанного параметра.

Глава 5. Исследование термдеформационных процессов и структурообразования при изготовлении, эксплуатации и ремонте наплавкой колес железнодорожного транспорта.

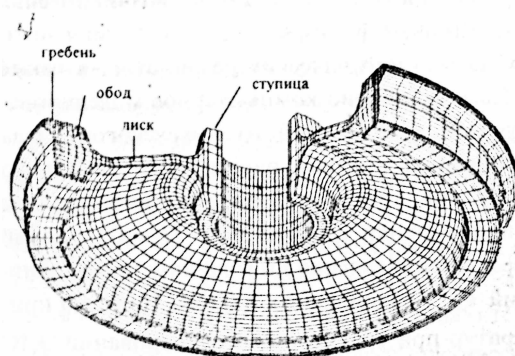


Рис. 8. Модель железнодорожного колеса

Проведено компьютерное моделирование в двух- и трехмерной постановках тепловых процессов, структурных превращений и кинетики НДС цельнокатаных колес вагонов при воздействии термической обработки (закалка+отпуск), термического цикла процесса наплавки при восстановлении изно-

шенных колес, эксплуатационных механических и температурных нагрузок. Разработаны и внедрены в практику рекомендации по параметрам термической обработки, наплавке и методике контроля изделий. Аналогичный комплекс работ проведен для бандажей и колес локомотивов. Колеса железнодорожного транспорта являются одним из наиболее ответственных конструктивных элементов к работоспособности и надежности которых предъявляются высокие требования. Разрушение колеса в эксплуатации, как правило приводит к большим экономическим потерям и негативным социальным последствиям. В последние годы возникла проблема, связанная с резким увеличением интенсивности износа колес, особенно в зоне гребня (рис.8), ограничивающего перемещение колесной пары в направлении поперек железнодорожной колеи. Материалом отечественных колес служит колесная сталь марки 2 по ГОСТ 10791. Это сталь со сравнительно высоким содержанием углерода ($C\ 0.55-0.63$, Si

0.2-0.45, Мп 0.5-0.9 %), что приводит к необходимости с большим вниманием относиться к возможным изменениям ее эксплуатационных характеристик при технологических и эксплуатационных воздействиях.

Спрейерная закалка колеса, вращающегося со скоростью 100 об/мин, производится с температуры 820-840 °С. Время охлаждения при закалке может изменяться в зависимости от содержания С и Мп в пределах от 100 до 240 сек. Отпуск производится в течение 3 часов при температуре 500-520 °С. На рис.9 приведено распределение мартенсита в поверхностных слоях обода в момент окончания закалки, содержание которого вблизи поверхности доходит до 100 %. Расчетная глубина прокаливаемого слоя соответствует экспериментальным данным. На рис. 10 представлены окружные напряжения в ободу колеса в момент окончания закалки. Максимальные растягивающие напряжения в ободу достигают 1000 МПа. Это может приводить к возникновению трещин, что подтверждается анализом зон начала разрушений колес в эксплуатации. После отпуска при температуре 500°С, моделирование которого производилось в упруговязкопластической постановке, уровень максимальных растягивающих окружных напряжений снижается до 267 МПа, а при уменьшении температуры отпуска до 300°С они повышаются от 267 МПа до 481 МПа. В трехмерной постановке проведено моделирование заводской процедуры контроля остаточных напряжений в колесе после термообработки. Получено хорошее соответствие расчетных и заводских данных. Показано, что величина растягивающих напряжений в момент окончания закалки зависит от времени охлаждения при закалке, на основании чего установлено ограничение на этот параметр, которое введено в нормативную документацию.

Проведено моделирование в осесимметричной постановке кинетики структур и НДС при одно- и двухдуговой наплавке изношенных гребней колес с целью выбора, варианта технологии наплавки, обеспечивающего наилучшее структурное состояние и НДС колес в зоне технологического влияния. Было рассмотрено несколько вариантов технологии, отличающихся по режимам наплавки, температуре подогрева, направлению наложения валиков. Анализ результатов моделирования показал, что наиболее надежные и стабильные по критериям отсутствия закалочных структур и уровню остаточных напряжений результаты при наплавке

гребней колес можно получить при двухдуговой наплавке с предварительным подогревом до $T=250^{\circ}\text{C}$.

Проведено сравнение НДС с экспериментально измеренными значениями. Получено удовлетворительное соответствие.

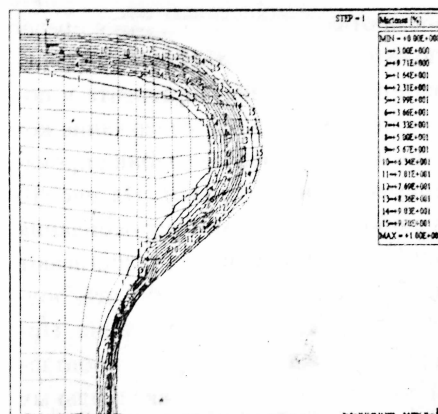


Рис.9. Распределение мартенсита на поверхности обода колеса после закалки

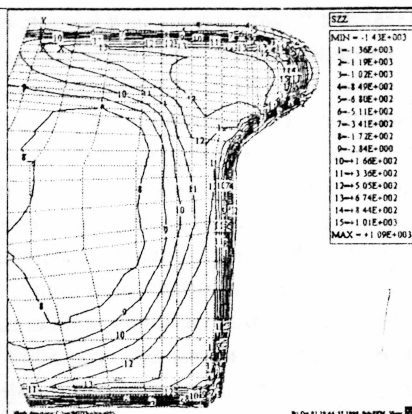


Рис.10. Распределение окружающих напряжений в ободу в момент окончания закалки (120с)

В трехмерной постановке выполнено расчетное моделирование НДС вагонных колес при воздействии механических эксплуатационных нагрузок от контакта колеса с рельсом с учетом НДС, возникающего от термообработки. Изучена кинетика формы и площади контактной зоны при возрастании нагрузки. Показано, что площадь контакта находится в экспериментально подтвержденных пределах 200-600 мм². Установлено, что в зонах перехода от обода к диску возникают циклические радиальные напряжения с амплитудой порядка 180 МПа при среднем уровне напряжений 270 МПа. В зоне перехода от диска к ступице колеса значения радиальных напряжений достигают ~560 МПа, а амплитуда их изменения составляет 40 МПа.

Проведено расчетное моделирование НДС локомотивных бандажированных колес при воздействии термических эксплуатационных нагрузок от торможений с учетом НДС, возникающего от термообработки бандажа и его посадки на центр. Колесо локомотива состоит из центра

(ступица+диск на рис.8) из стали 20Л и бандажа из колесной стали марки 2, посаженного на центр с натягом. Рассмотрены различные варианты торможения (длительное, экстренное, со смещением тормозных колодок и др.) в сочетании с различными величинами натяга. Показано, что наиболее неблагоприятным режимом является длительное торможение при смещении тормозных колодок на гребень. При этом максимальная температура нагрева составляет более 600°C, а растягивающие окружные напряжения в бандаже от натяга уменьшаются на 40%. После полного охлаждения максимальные окружные остаточные напряжения более, чем вдвое, превышают исходные (после ТО и посадки). Интенсивность пластической деформации возрастает до 4.04% в зоне внутреннего верхнего радиуса центра. Необходимо учитывать эти факторы при оценке ресурса колес.

Кроме перечисленных примеров, которые подробно рассмотрены в диссертации, разработанное программное и методическое обеспечение применялось еще в целом ряде исследований, не вошедших в рамки данной работы из-за ее ограниченного объема.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. Сформулирована концепция, заключающаяся в том, что развитие расчетных методов анализа и проектирования сварочной технологии необходимо проводить в следующих направлениях:

а) совершенствования методов моделирования кинетики структурных превращений при сварке для оценки структурного состояния сварных конструкций;

б) совершенствования физической модели материала в расчетах тепловых и деформационных процессов, с учетом возможного наличия различных структурных составляющих или их смесей в каждой точке модели для уточнения результатов расчета;

в) разработки методов трехмерного моделирования термомеханических процессов при сварке, снимающих ограничения, присущие двумерным моделям, на типы конструкций и режимы технологических процессов.

2. Разработана специализированная методика, позволяющая моделировать кинетику структурных превращений в изделиях при сварочном

технологическом воздействии с использованием термокинетических диаграмм металлов, а также решать термдеформационные упругопластические задачи в трехмерной постановке на стандартных персональных компьютерах с использованием суперэлементного подхода и физической модели материала, учитывающей возможное наличие различных структурных составляющих и их смесей в каждой точке модели.

3. Установлено, что для оценки стойкости сварных соединений против горячих трещин (ГТ), в зависимости от зоны их образования, целесообразно использовать следующие деформационные критерии: для сварного шва наиболее информативными являются компоненты собственных деформаций, накапливаемых в температурном интервале хрупкости, ориентированные вдоль и поперек оси шва, в околошовной зоне – интенсивность пластических деформаций, накопленных в ТИХ.

4. На базе этих критериев разработана расчетно-экспериментальная методика, позволяющая получить количественные данные для перехода от оценки стойкости материалов против ГТ на пробах к оценке технологической прочности реальных сварных конструкций.

5. На основании решения задачи о проплавлении тонких листов в трехмерной постановке для источника теплоты, движущегося с конечной скоростью, установлено, что причиной изменения величины и знака временного и остаточного прогибов пластин при постоянном режиме сварки и способе закрепления являются малые, в пределах толщины листа, начальные отклонения от плоской формы. При наличии начального прогиба «вверх» (с приближением к сварочному источнику) перемещения кромки пластины из плоскости на стадии сварки имеют синусоидальный, со сменой знака характер, а на стадии остывания непрерывно возрастают. При наличии начального прогиба «вниз» эти перемещения на стадии сварки монотонно возрастают, а на стадии остывания – убывают. Остаточные значения прогиба существенно ниже, чем в первом случае. При наличии начального «скручивания» листового элемента в процессе сварки и остывания форма пластины изменяется в сторону увеличения начального отклонения.

6. Применение гипотезы об одновременной укладке шва и решение задачи о расчете напряжений при сварке кольцевых швов труб в осесимметричной постановке дает погрешность по значениям максимальных напряжений в сварном шве не более 5% по сравнению с решением в

трехмерной постановке во всем диапазоне рассмотренных скоростей сварки (0.2 – 1.2 см/с). В зоне, прилегающей к шву, погрешность расчета окружных (продольных) напряжений может достигать 50%, однако она идет в запас прочности. Исследование процесса пространственного деформирования труб при сварке можно проводить только в трехмерной постановке.

7. Расчетным путем показано, что при электронно-лучевой сварке труб из никелевого сплава наличие сложной формы проплавления в сочетании с низкой теплопроводностью и высокой жаропрочностью обуславливает высокий уровень накопления растягивающих деформаций в ТИХ в направлении толщины стенки трубы в околосшовной зоне, что является причиной образования ГТ. С увеличением толщины труб в диапазоне 6-27 мм накопленная в ТИХ деформация имеет максимум при толщине 18 мм. При увеличении погонной энергии сварки максимум деформации, накопленной в ТИХ, смещается из «подгрибковой» зоны в середину шва. С увеличением скорости сварки величина этого критерия возрастает, что означает увеличение вероятности образования ГТ.

8. Разработанный с участием автора программный комплекс «WELD-3D» обеспечивает возможность решения широкого круга термомодеформационных задач сварки и сопутствующих технологических процессов. Проведенная всесторонняя верификация программного обеспечения показала хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, что свидетельствует об эффективности и корректности разработанных алгоритмов и программного обеспечения.

9. В результате компьютерного моделирования кинетики НДС и структурообразования в железнодорожных колесах при различных технологических и эксплуатационных воздействиях установлено, что одной из важных причин разрушения колес при эксплуатации могут являться высокие двухосные растягивающие напряжения, образующиеся при изготовлении в момент окончания закалки. Высокотемпературный отпуск при 500°C снижает закалочные напряжения с 800 до 260 МПа, а после отпуска при 300°C уровень остаточных растягивающих напряжений достигает 480 МПа, вследствие чего вероятность возникновения разрушений в эксплуатации возрастает.

10. Моделирование технологического процесса восстановления изношенного гребня колеса двухдуговой наплавкой, подтвержденное экспериментами, позволило установить возникновение в околословной зоне (ОШЗ) области с трехосным растяжением с компонентами, близкими к пределу текучести материала колеса. В этой же зоне возникают малопластичные структуры мартенсита и бейнита, что увеличивает вероятность образования трещин. Варьирование технологических параметров процесса при моделировании показало, что снижение содержания мартенсита в ОШЗ может достигаться при применении двухдугового процесса и температуре предварительного подогрева 250°C, а также при соблюдении интервала времени от окончания подогрева до момента начала наплавки в пределах 180 сек.

11. Моделирование процессов наложения эксплуатационных механических и термических нагрузок на поле начальных технологических напряжений и деформаций приводит к существенному перераспределению НДС колеса и появлению зон пластических деформаций в области контакта колеса и рельса и на радиусах перехода от обода к диску колеса, что необходимо учитывать при оценке ресурса колес.

12. Результаты работы внедрены в производство. Разработан проект «Технических условий на поставку цельнокатаных колес для скоростного движения». Выпущено «Извещение об изменении ТУ 0941-044-01124328-96; Бандажи черновые из непрерывнолитой заготовки углеродистой стали для подвижного состава железных дорог широкой колеи». Изменение утверждено ГОССТАНДАРТОМ РФ и внесено РЕЕСТР за номером 200\013675\01. Дан ряд конкретных рекомендаций по корректировке технологии изготовления цельнокатаных колес. Соответствующие документы прилагаются к диссертации. Полученные в диссертации результаты явились существенной частью научного обоснования работы «Исследования, разработка технологии, оборудования, материалов и вспомогательных средств для восстановления электродуговой автоматической наплавкой изношенных гребней колес подвижного состава и массовое их внедрение на сети железных дорог», отмеченной Премией Правительства РФ в области науки и техники за 1998 г. Ряд разработок, изложенных в диссертации, применяется в учебном процессе МИИТ.

Содержание диссертации отражено в 44 работах, основными из которых являются следующие:

1. Куркин А.С., Киселев А.С. Разработка программного обеспечения для моделирования термонапряженного состояния деталей и его применение для повышения качества сварных конструкций // Труды МВТУ им.Н.Э.Баумана. - 1988. - № 511. - С. 89-105.

2. Киселев А.С., Винокуров В.А., Куркин А.С. Зависимость временных напряжений в электрошлаковых швах от размеров брусьев, свариваемых в массивные детали // Вопросы повышения качества сварных конструкций: Сб. статей. - М., 1990. - С. 107-113.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния в круговых швах рам тележек вагонов метро / С.Н.Киселев, А.С.Киселев, В.В.Смирнов и др. // Сварочное производство. – 1993. - № 4. - С. 19-20.

4. Киселев С.Н., Киселев А.С. Моделирование процесса наплавки изношенных колес вагонов // Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях и в организациях: Сб. статей. - М., 1993. - С. 132-138.

5. Температурные поля, деформации и напряжения при наплавке гребней колес вагонов / С.Н.Киселев, А.С.Киселев, В.Б.Харитонов и др. // Повышение работоспособности деталей, сварных узлов и инструментов железнодорожной техники: Сб. научных трудов МГУ ПС. - М., 1993. – № 872. - С. 30-38.

6. Киселев С.Н., Киселев А.С., Смирнов В.В. Расчетная оценка остаточных напряжений в сварном узле шпинтона тележки вагона метрополитена // Повышение работоспособности деталей, сварных узлов и инструментов железнодорожной техники: Сб. научных трудов МГУ ПС. - М., 1993. – № 872. - С. 47-52.

7. Киселев С.Н., Киселев А.С., Кузьмина Г.Д. Решение нелинейных задач нестационарной термоупругопластичности применительно к сварке и наплавке конструктивных элементов // Прикладная физика: Науч.-техн. сб. – М., 1994. - №3. С. 98-101.

8. Компьютерное моделирование технологии наплавки цельнокатанных колес. / С.Н.Киселев, А.С.Киселев, Г.Д.Кузьмина и др. // Состояние и перспективы восстановления и упрочнения деталей машин: Сб. статей. - М., 1994. - С. 81-83.

9. Температурные поля, деформации и напряжения в цельнокатанных вагонных колесах при различных режимах торможения / В.Г.Иноземцев, С.Н.Киселёв, А.С. Киселёв и др. // Вестник ВНИИ Железнодорожного транспорта. – 1994. - № 7. - С. 13-17.

10. Оценка ресурса цельнокатанного колеса при малоцикловом термоупругопластическом деформировании с учетом режимов торможения вагона / В.Г.Иноземцев, С.Н.Киселёв, А.С.Киселёв и др. // Вестник ВНИИ Железнодорожного транспорта. – 1995. - № 4. - С. 40-43.

11. Влияние подогрева при наплавке цельнокатанных колес вагонов на остаточные напряжения и деформации / С.Н.Киселев, А.С.Киселев, А.В. Саврухин и др. // Сварочное производство. – 1995. - № 12. - С. 3-7.

12. Оценка ресурса цельнокатанного колеса, восстановленного наплавкой, при малоцикловом нагружении / С.Н.Киселев, А.С.Киселев, Р.И.Зайнетдинов и др. // Сварочное производство. – 1995. - № 12. - С. 18-22.

13. Киселев С.Н., Киселев А.С., Кузьмина Г.Д., Теоретические и экспериментальные исследования технологии двухдуговой автоматической наплавки под слоем флюса изношенных гребней цельнокатанных вагонных колес // Конструкторско-технологическое обеспечение надежности колес рельсовых экипажей: Сб. статей. – С.-Пб., 1997, - С. 45-53.

14. Киселев А.С., Иванова О.И., Тутнов И.А. Возможности метода суперэлементов при расчете остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях труб для решения задач безопасной эксплуатации // Безопасность трубопроводов: Сб. докладов второй международной конференции. – М., 1997. - С. 1-12.

15. Современные аспекты компьютерного моделирования тепловых, деформационных процессов и структурообразования при сварке и сопутствующих процессах / Киселев С.Н., Киселев А.С., А.С.Куркин и др. // Сварочное производство. – 1998. - № 10. – С. 31-36.

16. Киселев С.Н., Киселев А.С., Саврухин А.В. Компьютерное моделирование тепловых и деформационных процессов при сварке и сопутствующих процессах // Инженерный справочник. – 1999. - № 1. - С. 21-28.

17. Киселев А.С Компьютерное моделирование тепловых, структурных и деформационных процессов при термических технологических воздействиях // Заводская лаборатория. – 1999. - Т. 65, № 10. - С. 41-48.