

М 491284
Государственный комитет СССР по народному образованию

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

КИСЕЛЕВ Алексей Сергеевич

УДК 621.791.052

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ РАЗРУШЕНИЮ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ СВАРКЕ И ТЕРМООБРАБОТКЕ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

05.03.06 – Технология и машины
сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - д.т.н., профессор ВИНЮРОВ В.А.

Научный консультант - к.т.н., с.н.с. КУРКИН А.С.

Официальные оппоненты : д.т.н., профессор ЛУКЬЯНОВ В.Ф.
к.т.н., доцент КАЛИНИН В.Н.

Ведущее предприятие - ЦНИИТМАШ

Защита состоится 13 IX - 1990 г. на заседании специализированного Совета К-053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская

заверенный печатью,

библиотеке

_____ 1990г.

М 4912 84

В.И.ГИРШ

_____ п.л. Тираж 100 экз.
/ им. Н.Э.Баумана.



1491284

Киселев А.С. Повышение сопр

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из характерных черт развития тяжелого машиностроения является увеличение единичной мощности машин и оборудования, что приводит к необходимости изготовления все более крупных деталей, вес которых достигает сотен тонн, а габаритные размеры нескольких метров. К таким деталям можно отнести валки мощных прокатных станков, детали прессов, гидротурбин, молотов, корпусные детали оборудования атомных электростанций и др. Технологические циклы изготовления таких деталей являются достаточно сложными и дорогостоящими и, как правило, включают операции сварки и термообработки, которые позволяют получить заготовку нужных размеров, уменьшить материалоемкость и затраты на механическую обработку, снизить остаточные напряжения или получить нужные прочностные свойства в отдельных зонах детали. С другой стороны эти операции могут оказывать отрицательное влияние на качество деталей. Оно выражается в изменении свойств металла в зоне технологического воздействия, в возникновении пластических и упругих деформаций, в появлении специфических для сварных соединений форм концентраторов напряжений и деформаций. При определенных условиях сочетание отрицательных факторов может привести к разрушению детали или образованию в детали крупного дефекта, исключающего ее дальнейшую эксплуатацию. В настоящее время недостаточно разработаны методы оценки влияния различных конструктивно-технологических факторов процессов сварки и термообработки на трещиностойкость крупногабаритных конструкций. Разработка таких методов является актуальной, т.к. позволит обоснованно принимать рациональные в отношении прочности конструктивно-технологические решения и снизить вероятность возникновения разрушений уже на стадии проектирования технологических процессов.

Цель работы заключалась в создании расчетно-экспериментальной методики оценки сопротивляемости разрушению крупногабаритных деталей при их сварке и термообработке, позволяющей обоснованно выбирать рациональные конструктивно-технологические решения.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя численные методы элементарных балансов, конечных элементов (МКЭ) и метод наименьших квадратов с использованием неизоэотермической теории упругости и теории пластического течения. Расчеты произ-

водились на ЕС ЭВМ с использованием языков *FORTRAN* и *ASSEMBLER*

Экспериментальные методы состояли в испытаниях образцов на растяжение для определения механических свойств сталей на установке АЛА-ТОО, а также испытаниях на статический изгиб образцов, содержащих трещины, на специальной установке при программированном нагружении.

Научная новизна работы

1. Разработана методика оценки трещиностойкости элементов конструкций применительно к сварке и термообработке, заключающаяся в испытании образцов с трещинами в условиях термомеханических циклов, соответствующих наиболее нагруженным точкам деталей. Количественной мерой трещиностойкости является максимальный размер предполагаемого дефекта, при котором не происходит страгивания трещины в образце в процессе испытаний.

2. Разработана расчетная методика воспроизведения термомеханического цикла в опасной точке детали при сварке и термообработке на образце с трещиной с учетом всех компонентов деформаций.

3. Разработана математическая модель расчета НДС в сварных соединениях по схеме "плоского слоя" с применением специальной матрицы градиентов в рамках МКЭ.

4. Установлено, что основными причинами снижения трещиностойкости металла ОШЗ при электрошлаковой заварке дефектов в массивных телах являются наличие объемных растягивающих напряжений и перегрев металла в углу П-образного шва. Выбор рациональной формы сечения ввариваемого бруса приводит к снижению остаточных напряжений на 20% и увеличению допускаемого размера дефекта в 2 раза.

Практическая ценность работы состоит в том, что на основе разработанных методик и алгоритмов проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) при сварке и термообработке в крупногабаритных деталях кузнечно-прессового и прокатного оборудования. С использованием установленных закономерностей проведена расчетная и экспериментальная оценка трещиностойкости и на ее основе переданы производству практические рекомендации по выбору рациональных конструктивно-технологических решений при изготовлении этих деталей.

В соавторстве с к.т.н. Куркиным А.С. разработан комплекс программы "Сварка", позволяющий эффективно рассчитывать и оценивать температурное состояние и НДС и их изменение во времени

в двух- и трехмерных деталях сложной формы, в сварных соединениях с концентраторами при упругом и упруго-пластическом поведении металла в условиях неизоэтермического нагружения. Комплекс внедрен на ПО "Атоммаш".

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана. По материалам диссертации опубликовано 2 работы. Проведена аттестация программного комплекса "Сварка" в НИКИЭТ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, раздела с основными результатами и выводами, списка литературы из 105 наименований, приложения и содержит 119 страниц машинописного текста, 70 рисунков и 1 таблицу. В приложении приведены документы, подтверждающие практическое использование результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, содержатся краткие сведения о технологии изготовления крупногабаритных деталей, и о возможных типах разрушений при термомеханическом воздействии на них процессов сварки и термообработки.

В первой главе выполнен анализ работ, посвященных изучению термомеханических процессов, протекающих в крупногабаритных стальных деталях при сварке и термообработке.

Математическому моделированию этих процессов, связанному с определением температурного, структурного и напряженно-деформированного состояний в деталях посвящены работы Г.А.Николаева, В.А.Винокурова, В.И.Махненко, А.Г.Григорьянца, Н.Н.Прохорова, А.Н.Хакимова, В.М.Сагалевица, О.А.Бакиши, В.В.Абрамова, Н.П.Морозова, В.Е.Лощкарева, В.А. Ломакина и др. Выполненный анализ литературных источников позволил заключить, что несмотря на значительные успехи ученых в этом направлении, данная проблема, в силу своей сложности, далека от окончательного разрешения. Проблема в значительной степени осложняется протеканием структурных превращений, связанных с выделением или поглощением тепла, а также оказывающих влияние на теплофизические и механические характеристики металлов (в частности, вызывающие сверхпластичность металла).

Реальные процессы сварки и термообработки крупногабаритных деталей протекают с образованием пластических деформаций. Условия нагружения металла деталей от неравномерного нестационарного нагрева существенно отличаются от простого нагружения. В связи с этим решение необходимо проводить, применяя теории, описывающие историю нагружения, с использованием модели упруго-вязко-пластической среды, с учетом изменения структурного состава. В такой постановке вышеуказанная задача решена для случая термообработки крупногабаритных бандажей валков прокатного стана в работе Покровского А.М. по осесимметричной геометрически линейной схеме. Для случаев сварки такие решения отсутствуют. В данной работе решение указанных задач проводилось в упруго-пластической постановке, с учетом зависимости свойств материала от температуры и структуры, без учета явлений ползучести, но с возможно более полным моделированием геометрических форм деталей и сварных швов. Получение такого решения возможно лишь с применением численных методов. В работе использовался метод элементарных балансов для определения температур и метод конечных элементов для определения НДС.

Далее, проведен анализ существующих критериев трещиностойкости при статическом нагружении. В настоящее время накоплен значительный опыт в использовании критериев механики разрушения для оценки прочности элементов конструкций, достигнуты значительные успехи в развитии расчетных и экспериментальных методов их определения. Наибольший вклад в этих вопросах внесли Махутов Н.А., Морозов Е.М., Винокуров В.А., Куркин С.А., Лукьянов В.Ф., Красовский А.Я., Панасюк В.В., Ирвин Д.Р., Мак-Клинтон Ф.А. и др. Из анализа следует, что для оценки трещиностойкости деталей при термомеханическом воздействии необходимо использовать критерии нелинейной механики разрушения (НЛМР), ни один из которых не имеет пока полного теоретического и экспериментального обоснования. В связи с этим одной из задач работы являлось глубокое исследование возможности применения одного из критериев НЛМР для оценки трещиностойкости крупногабаритных деталей при сложном неизотермическом нагружении.

На прочность детали в ходе высокотемпературной обработки влияют следующие основные факторы: конструктивный, технологический, свойства материала, дефектность. Метод оценки трещиностойкости детали в процессе ее обработки должен опираться на

учет тесного взаимодействия всех этих факторов. Анализ существующих методов оценки сопротивляемости разрушению показал, что ни один из них не отвечает в полной мере этому требованию. Расчетные методы механики разрушения основаны на использовании весьма приближенных моделей прочности материала, не учитывающих изменений, происходящих в нем, в связи с историей неизотермического нагружения. Экспериментальные методы оценки технологической прочности, наоборот, не учитывают особенностей, связанных с конструкцией детали. В связи с этим актуальной является проблема создания расчетно-экспериментального метода оценки трещиностойкости элементов конструкций применительно к сварке и термообработке, в большей мере отвечающего выдвинутому требованию. На основании вышеизложенного в работе сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке расчетно-экспериментального метода оценки трещиностойкости крупногабаритных деталей при сварке и термообработке, идея которого предложена Винокуровым В.А. Основные его положения состоят в следующем:

1. Производится расчет температурных полей и соответствующих им НДС в рассматриваемой детали при сварке и термообработке.

2. На основании анализа НДС определяются опасные точки детали и термодформационные циклы в этих точках.

3. Вводится допущение, что в опасной точке расположена вершина трещиноподобного дефекта заданного размера.

4. Расчетным путем определяется термодформационный цикл в опасной точке детали и программа нагружения образца с трещиной из материала детали, обеспечивающая воспроизведение этого цикла.

5. Результаты численного моделирования используются для испытания образца на специальной установке, разработанной м.н.с. Крутовым В.А.. Испытания проводятся на нескольких образцах с программами нагружения, соответствующими различным размерам предполагаемого дефекта.

6. Количественной мерой трещиностойкости детали в рассматриваемой опасной точке служит максимальный размер предполагаемого дефекта, при котором не происходит срагивания трещины в образце в процессе испытаний.

Одним из определяющих моментов рассматриваемого метода является процедура перехода от оценки прочности и трещиностойкос-

ти на лабораторных образцах к оценке этих же параметров в реальных крупногабаритных деталях в условиях технологического воздействия. В настоящее время не разработано достаточно универсальных математических моделей для реализации таких процедур. Основными требованиями к подобным моделям можно считать: *

1. Адекватное описание НДС у вершины трещины в образце и у вершины трещиноподобного дефекта в детали.
2. Учет сложного трехмерного НДС, имеющего место в области, охватывающей опасную точку.
3. Учет изменяемости механических свойств материала в широком диапазоне изменения температур.

Разработка процедуры моделирования условий нагружения в опасной точке детали на образце, содержащем трещины, производилась на основе использования критерия локальных деформаций в качестве критерия подобия НДС у вершины трещины. Критерий локальных деформаций ϵ_D , предложенный В.А.Винокуровым, обладает рядом преимуществ по сравнению с другими критериями (K_c, J, σ, K_{IC}), а именно: а) его использование возможно в неизотермических условиях; б) четко определена база его определения; в) не вводятся дополнительных гипотез для получения его численных значений; г) возможность сопоставления на его основе различных типов концентраторов, присутствующих в сварном соединении. В процессе сравнения критерия ϵ_D с некоторыми другими проведено тестирование получаемых на базе МКЭ решений у вершины трещины и подтверждена их достаточная точность.

В соответствии с выбранным критерием подобия при моделировании реального процесса деформирования на экспериментальном образце с трещиной, необходимо в каждый момент времени на протяжении процесса нагружения знать величину ϵ_D и температуру у вершины ожидаемого дефекта в детали. При этом должно выполняться условие:

$$\epsilon_{D \text{ детали}} = \epsilon_{D \text{ образца}} \quad (I)$$

К основным факторам, определяющим величину ϵ_D , можно отнести НДС в рассматриваемой точке, механические свойства материала в неизотермических условиях и размер предполагаемого дефекта. Для моделирования ожидаемого дефекта в реальной детали была решена МКЭ задача о нагружении фрагмента тела с внутренней дискообразной трещиной. Фрагмент тела был выбран цилиндрической формы, причем радиус цилиндра значительно больше радиуса

трещины, что характерно для реальных дефектов в крупногабаритных деталях. Такая осесимметричная модель, с одной стороны, достаточно точно воссоздает ситуацию при наличии внутреннего дефекта в объемном теле, с другой стороны она является квазиобъемной, что значительно облегчает проведение расчетов. Условия на границе фрагмента соответствовали деформированному состоянию в опасной точке детали и определялись двумя параметрами: ε_i - интенсивностью деформаций и ε_o - средней деформацией в рассматриваемой точке. В качестве параметра, характеризующего свойства материала, выбрана величина деформации предела текучести, которая полностью определяет диаграмму идеального упруго-пластического тела. Целью моделирования было получение зависимости ε_D от перечисленных выше факторов.

Величины приращений $\Delta \varepsilon_i$, $\Delta \varepsilon_o$ и величина ε_i определяются в каждой точке тела и в каждый момент времени из решения МКЭ, моделирующего заданный процесс сварки или термообработки. Решая последовательно задачу о фрагменте с граничными условиями, соответствующими $\Delta \varepsilon_i$ и $\Delta \varepsilon_o$, можно получить функцию изменения ε_D в рассматриваемой точке тела на протяжении всего цикла сварки или термообработки. Переход от приращений нагружающих деформаций к значениям ε_i и ε_o и решение ряда задач для фрагмента тела при различных уровнях и соотношениях компонентов деформаций позволили получить аналитические зависимости, связывающие ε_D с перечисленными выше параметрами. Тестирование этих зависимостей на основе сравнения с решением в приращениях деформаций показало их удовлетворительное соответствие.

Также из решения МКЭ получена зависимость величины ε_D от угла раскрытия берегов трещины θ в образце, который может отслеживаться испытательной установкой при проведении эксперимента.

Таким образом, разработанные математические модели и численные решения позволяют проводить испытания на трещиностойкость, при которых деформированное состояние у вершины трещины в образце соответствует деформированному состоянию в опасной точке исследуемой детали при наличии в ней вершины дефекта заданного размера. Синхронно с нагружением образца происходит его нагрев и охлаждение, соответствующие термическому циклу в рассматриваемой точке детали. Разработано программное обеспечение, с помощью которого расчет программ нагружения образцов производится в ав-

томатическом режиме на ЭВМ.

Третья глава посвящена разработке методики моделирования термомеханических процессов при сварке и термообработке сварных деталей произвольной формы.

Задача об определении температурных полей и структурного состояния формулировалась как нелинейная нестационарная краевая задача теории теплопроводности со всеми возможными типами граничных условий. Решение этой задачи проводилось методом элементарных балансов с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры и структуры, зависимости граничных условий от времени и температуры, а также скрытой теплоты структурных превращений, с применением явной схемы для интегрирования уравнения теплопроводности по времени. При этом предложено производить дискретизацию тела на элементарные объемы типа многогранника Вороного. Свойства многогранника таковы, что его грани строятся как плоскости (линии), нормальные к отрезкам, соединяющим рассматриваемую точку тела с соседними ближайшими точками и пересекают эти отрезки в их середине. Тестирование показало, что применение такой дискретизации позволяет повысить точность решения в 10 раз при том же числе элементов по сравнению с вариантом дискретизации тела детали на элементы, подобные по форме конечным элементам, применяемым затем для расчета НДС. Разработано программное обеспечение для разбиения тела произвольной формы на элементы Вороного.

Для повышения эффективности решения задачи по явной схеме применительно к сварке использовалась процедура ускорения решения, суть которой заключалась в сведении К-слойной (по времени) задачи к эквивалентной двухслойной путем введения вспомогательного массива температур в точках тела.

Решение термокинетической задачи упруго-пластического деформирования деталей сложной формы проводилось МКЭ. В качестве основной механической модели рассматривалась модель, основанная на квазистатической теории напряженного состояния в сочетании с предположением о малости деформаций. Основными уравнениями этой модели являются общеизвестные дифференциальные уравнения равновесия, связи между перемещениями и деформациями, совместности деформаций. Физическая модель включала в себя уравнения связи между деформациями и напряжениями и основана на теории пластического течения для идеально упруго-пластического материа-

ла с условием наступления текучести Мизеса.

Для учета нестационарности процессов сварки и термообработки и истории нагружения в расчетах применялся метод пошагового решения, при котором на каждом последующем шаге решение находится с учетом полученного на предыдущем шаге. На каждом отдельном шаге МКЭ решалась упруго-пластическая задача. Для реализации физической нелинейности использовался итерационный процесс по методу упругих решений с постоянной упругой матрицей жесткости. Исследования показали, что для случаев сварки и термообработки характерно сложное нагружение, в условиях которого целесообразно применение именно упругой матрицы жесткости. Это позволяет существенно сократить затраты машинного времени на каждую итерацию. Применение упруго-пластических матриц жесткости, являющееся весьма эффективным средством ускорения решения для нагружения, близкого к простому, для рассматриваемых задач почти не уменьшает (а иногда увеличивает) число итераций на шаге решения и приводит к значительно большим затратам машинного времени.

Для вычисления напряжений в пластической области применялось аналитическое интегрирование уравнений теории пластического течения для кусочно-линейного пути нагружения, имеющего место при пошаговом решении. Это позволило значительно сократить расход машинного времени на каждую итерацию, особенно при наличии развитых пластических зон.

Механические свойства материала принимались на протяжении одного шага решения изменяющимися линейно от значений в начале шага до значений в конце шага. Учет влияния изменения свойств на результаты решения проводился путем введения в вектор нагрузки разрешающей системы уравнений соответствующих поправок.

Разработанные методики и программное обеспечение позволили перейти к оценке прочности и трещиностойкости реальных крупногабаритных деталей при сварке и термообработке.

Четвертая глава посвящена оценке прочности и трещиностойкости при проведении ремонта крупногабаритных деталей с применением электрошлаковой сварки.

В заготовках крупногабаритных деталей достаточно часто возникают дефекты литья, сварных швов и другие. На практике в случае обнаружения дефекта производят ремонтные работы, заключающиеся в вырезании части детали, содержащей дефект и вварке на это место бруса из качественного металла электрошлаковым способом.

Это позволяет избежать отбраковки заготовок и деталей, стоимость которых составляет десятки и сотни тысяч рублей. При проведении ремонта наблюдались случаи возникновения в швах и околошовных зонах (ОШЗ) протяженных трещин. Было установлено, что при соблюдении одной и той же технологии сварки на процесс образования трещин оказывают влияние размеры и форма ввариваемых брусев. Исследование временных и остаточных полей температур, деформаций и напряжений в электрошлаковых сварных швах и ОШЗ, а также оценка трещиностойкости позволили предложить конструктивные решения, наиболее рациональные с позиций прочности. На рис. 1а представлена схема сварки бруса в середину грани массивного тела. Эта схема и приведенные размеры соответствуют схемам проведения ремонтных работ бабы мощного бесшаботного молота, которые проводились на НМЗ им. В.И.Ленина. Материал детали - сталь 20ХНМФ. Для оценки влияния формы ввариваемого бруса на НДС при электрошлаковой сварке были просчитаны варианты: сварки прямоугольного бруса (рис. 1б), сварки прямоугольного бруса с закруглением на конце (рис. 1в), сварки треугольного бруса (рис. 1г). Для оценки влияния соотношений размеров брусев на НДС для вариантов 1б и 1в просчитывались подварианты при отношении размеров паза под брус по ширине и глубине от 0,12 до 2,67.

Решение задачи для схемы сварки на рис. 1а в соответствии со сформулированными в главе 3 моделями должно быть получено в трехмерной постановке, то есть с учетом изменения температурного поля и НДС по всем трем координатам. Однако в этом случае, из-за специфики сварочных задач (высокие градиенты температур, деформаций и напряжений в ОШЗ), применение численных методов приводит к чрезмерным затратам ресурсов ЭВМ, что не позволяет применять такие расчеты в инженерной практике. В то же время существует ряд соображений, позволивших свести задачу к плоской схеме решения. Основным допущением при этом являлась гипотеза о малом влиянии тепловых потоков в направлении оси Oz (рис. 1а) на термомодеформационные процессы в плоскости, нормальной к Oz , в условиях действия квазистационарного источника теплоты на стадии остывания детали. Оценка погрешности, вносимой этим допущением в результаты решения температурной задачи, показала, что решение с учетом потоков теплоты в направлении Oz и без учета максимально различается в высокотемпературной зоне, дефор

магии и напряжения в которой мало влияют на НДС всей детали, и отличие не превышает 15%. При решении механической части этой задачи альтернативой объемному решению является решение по схеме плоской деформации (ПД), которое, как следует из литературных данных, дает удовлетворительные результаты для слоев тела, достаточно удаленных от начала и конца шва. В данной работе предложено использовать схему плоского слоя (ПС), которая в отличие от схемы ПД, где принято $\varepsilon_z = 0$, требует вычисления ε_z по формуле:

$$\varepsilon_z = z_0 + d_y \cdot x + d_x \cdot y, \quad (2)$$

где z_0 — смещение плоскости XOY в направлении оси OZ, d_x и d_y — углы поворота этой плоскости относительно осей OX и OY, X и Y — координаты. Для реализации этой схемы в рамках МКЭ предложена следующая матрица градиентов:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & y & x \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где N_i — функции формы конечного элемента.

Тестирование показало, что схема ПС значительно лучше, чем схема ПД описывает распределение напряжений и деформаций в направлении OZ и удовлетворительно соответствует результатам объемного решения.

Проведен анализ возможности применения плоских схем для деталей различной толщины. Показано, что отличие решения по плоской схеме от объемного не превышает 10% при выполнении соотношения:

$$H^2/F \geq 0,3$$

где H — толщина детали в направлении оси OZ; F — площадь нормального к оси OZ сечения.

На базе разработанных методик был решен ряд плоских задач для конфигураций брусьев, представленных на рис. 1б, в, г, получены распределения температур и НДС при различном соотношении размеров брусьев. Анализ НДС позволил выделить опасные точки в сварных соединениях и оценить по разработанной в главе 2 методике трещиностойкость материала детали в этих точках. При оценке трещиностойкости для каждого варианта выделялось по две точки с наибольшими значениями максимальных главных напряжений. Сдвиг

точка - из зоны, прошедшей структурные превращения (ОШЗ) и одна - из зоны, не испытавшей их. Трещиностойкость зоны сварного шва (зоны расплавленного металла) в данной работе не оценивалась в связи с тем, что за счет качественных присадочных материалов металл этой зоны может быть доведен до состояния, в котором его прочность и трещиностойкость не будут уступать основному металлу. Таким образом, подобная оценка в большей степени необходима для основного металла крупногабаритных деталей, легирование которого дорогостоящими компонентами экономически не целесообразно. Наиболее важные результаты данного исследования сформулированы в п.7 основных выводов и результатов.

Пятая глава посвящена оценке прочности и трещиностойкости крупногабаритных сварных валков прокатного стана в процессе закалки его рабочей поверхности. Чертеж валака представлен на рис. 2. Целью исследования являлось решение вопроса о целесообразности применения одной из марок сталей 65ХЗМФА и 55Х2МФБ для изготовления валака. Ранее была решена задача о закалке валака из стали 65ХЗМФА в одномерной постановке и изучены свойства и кинетика структурных превращений этой стали. Задачами настоящей работы было проведение расчетов с более точным учетом геометрии детали в двумерной осесимметричной постановке для обеих марок сталей и сравнение их трещиностойкости на базе разработанного метода. Для численного моделирования процесса термообработки была выделена зона вблизи торца рабочей части валака (между линиями АА и ВВ). Сравнение полученных решений вблизи линии АА с полученным ранее для стали 65ХЗМФА одномерным решением показало их хорошее соответствие. Анализ НДС позволил выделить опасные зоны валака. Это - зона под границей закаленного слоя в средней части валака с максимальными главными растягивающими напряжениями, и зона у торца рабочей части валака в закаленном слое, в которой значения $\sigma_{\max}$ превышают аналогичные в закаленном слое средней части валака в три раза. Таким образом, учет геометрической нелинейности при решении задачи оказался существенным. Далее была определена трещиностойкость выделенных зон для обеих марок сталей. Для всех зон трещиностойкость стали 65ХЗМФА в условиях заданного режима термообработки выше, чем стали 55Х2МФБ. В связи с этим для изготовления валков была рекомендована сталь 65ХЗМФА.

1. Выбор рациональных в отношении прочности конструктивно-технологических решений при разработке технологии процессов сварки и термообработки крупногабаритных деталей необходимо производить как по классическим критериям прочности, так и по критериям трещиностойкости на базе математического и численного моделирования термомеханических процессов, протекающих в деталях.

2. В развитие расчетно-экспериментального метода оценки трещиностойкости элементов конструкций, предложенного В.А.Винокуровым применительно к сварке и термообработке, разработана методика, заключающаяся в моделировании термомеханических циклов в опасных точках детали и на образцах из материала детали, содержащих трещину. Количественной мерой трещиностойкости при этом служит максимальный размер предполагаемого или реального дефекта с вершиной в опасной точке, при котором не происходит срабатывания трещины в образце в процессе испытаний.

3. На основании проведенного анализа ряда критериев нелинейной механики разрушения установлено, что в наибольшей мере требованию к параметру подобия напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в крупногабаритной детали и в экспериментальном образце при сложном неизотермическом нагружении отвечает критерий локальных деформаций.

4. Установлено, что для обеспечения процесса моделирования кинетики напряженно-деформированного состояния в опасной точке детали на образцах необходимо иметь расчетные данные об изменении во времени в этой точке величин интенсивности деформаций, средней деформации и деформации предела текучести. На основе численного моделирования НДС у вершины трещины в крупногабаритном теле получены аналитические зависимости, связывающие значения локальных деформаций у вершины дефекта с деформированным состоянием в опасной точке, размером дефекта и свойствами материала.

5. Разработан алгоритм расчета программы нагружения экспериментальных образцов, которая реализует эквивалентную в отношении трещиностойкости ситуацию в образце и опасной точке детали. Проведено тестирование и подтверждена работоспособность алгоритма.

6. Разработано и оттестировано программное обеспечение для расчета температурных полей и НДС в телах сложной формы при сварке и термообработке методами элементарных балансов и конечных элементов соответственно. Установлено, что при использовании метода элементарных балансов, для повышения точности и скорости решения целесообразно использовать дискретизацию деталей в виде сетки Вороного.

7. С использованием разработанной методики и программного обеспечения проведены расчеты температурных полей и НДС и оценка трещиностойкости при проведении ремонта крупногабаритной бабы бесшаботного молота из стали 20ХНМФ путем сварки бруса в выфрезерованный паз с применением электрошлаковой сварки. Установлены следующие закономерности образования напряжений:

- при заварке паза в середине грани детали максимальные главные напряжения на 30% выше, чем при заварке паза на углу;

- величина максимальных главных напряжений может быть снижена за счет увеличения ширины вырезанного паза при заданной глубине. Снижение напряжений достигается при ширине паза более 0,4 его глубины и составляет 79% от максимального уровня при отношении указанных размеров 1:1. Дальнейшее увеличение ширины паза не вызывает снижения уровня напряжений.

Оценка НДС и трещиностойкости для различных форм ввариваемых брусьев показала, что наиболее неблагоприятным вариантом является вариант сварки узкого бруса прямоугольной формы. Наиболее опасной зоной в этом случае является участок околосшовной зоны вблизи угла П-образного шва. Это связано с возникновением здесь объемного НДС и перегревом металла. Критический размер трещиноподобного дефекта в ней составляет 10 мм.

Наиболее рациональным конструктивным решением можно считать вариант сварки бруса с закруглением на конце. В этом случае наиболее опасный угловой участок шва отсутствует, за счет чего размер критического дефекта увеличивается в два раза и составляет 20 мм.

8. Разработанная методика применена для оценки трещиностойкости крупногабаритного вала стана ТЛС5000 в процессе термообработки материала вала из двух марок стали 65ХЗМФА и 55Х2МФВ, обеспечивающего лучшую сопротивляемость разрушению.

Анализ трещиностойкости показал, что критический размер

дефекта при заданных режимах термообработки для стали 65ХЗМФА составляет 50 мм, а для стали 55ХЗМФВ - 20 мм, в связи с чем для изготовления опорных валков стана ТЛС5000 была рекомендована сталь 65ХЗМФА.

9. Разработанный программный комплекс "Сварка" внедрен на ПО "Атоммаш". Ожидаемый экономический эффект 172 тыс. руб.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Киселев А.С., Винокуров В.А., Куркин А.С. Упруго-пластический расчет напряженно-деформированного состояния валков при термообработке / ЦНИИТЭИтяжмаш. М., 1988. - ч.7. - С.134-137. - Деп. В ВИНТИ 12.09.88, № 32-тм88.
2. Куркин А.С., Киселев А.С. Разработка программного обеспечения для моделирования термонапряженного состояния деталей и его применение для повышения качества сварных конструкций // Труды МВТУ. - 1988. - №511. - С.89-105.

Кис

