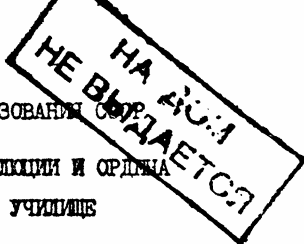


М/432341

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ССРС
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ
имени Н.Э. Баумана



На правах рукописи

НУРТУЖИН Марат Рахмалиевич

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

05.05.05 - Подъемно-транспортные машины

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1985

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор А.В. Вершинский.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор В.С.Игнатьева;
кандидат технических наук
Г.А.Воронцов.

Ведущая организация — Ленинградский завод ПТО им.С.М.Кирова.

Защита состоится "16" декабря 1985 г. на заседании
специализированного совета К 053.15.10 в Московском высшем
техническом училище им. Н.Э. Баумана: 107005, г. Москва, 2-ая Бау-
манская, д. 7

С дис
Н.Э. Баума

ТУ им.

Автор

Ученн
специализи
канд.тех

Мини

М 432341

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы и на период до 1990 года" указывают, что необходимо "повышение качества, надежности, экономичности и производительности, уменьшение шума и вибрации машин, оборудования и других изделий машиностроения, снижение металлоемкости и энергопотребления". Известно, что большая часть металла (60-80%) необходимого на изготовление подъемно-транспортных машин, используется на изготовление крановых металлоконструкций. Создание современных металлических конструкций кранов, отвечающих требованиям эксплуатации, связано с повышением их технологичности и несущей способности. При этом важную роль играет сварка. Она позволяет экономить материалы, повышать производительность труда, но вместе с тем в результате сварки возникают остаточные напряжения и деформации.

Наличие остаточных напряжений и деформаций в ряде случаев является одним из определяющих факторов, влияющих на несущую способность изделия. Разрушения элементов и узлов сварных крановых металлоконструкций, особенно при переменных нагрузках и низких температурах, часто связаны с их действием. Остаточные сварочные перемещения, возникающие на стадии изготовления, приводит к заметным изменениям геометрии балок. Поэтому разработка облегченных крановых конструкций должна вестись с учетом несущей способности изделий, имеющих остаточные напряжения и деформации.

Решение задачи об остаточных напряжениях и деформациях в зонах сварных соединений является существенным этапом на пути к количественному определению деформативности крановых балок, долговечности узлов и их сопротивления хрупким разрушениям, оценке местной устойчивости листовых элементов. Для расчета напряженно-деформированного состояния сварных узлов крановых металлоконструкций, для которых характерно наличие большого числа сварных швов и пространственная многомерность, существующие методы недостаточны. В связи с этим создание методов расчета остаточных напряжений и деформаций, в том числе и объемных, выявление закономерностей их развития и разработка мероприятий, направленных на повышение несущей способности крановых металлоконструкций, является актуальной задачей.

М432.341
НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1432341

Нургужин М.Р. Разработка ра



Цель исследования. Работа направлена на создание экономических алгоритмов численного решения задачи определения остаточных напряжений и деформаций после сварки и нагружения, их анализ и разработку мероприятий, обеспечивающих повышение несущей способности крановых металлоконструкций.

Методы исследования. Расчетные методы основываются на использовании метода конечных элементов (МКЭ) в трехмерной и двумерной постановке и неизотермической теории течения с применением мощных ЭВМ. Экспериментальные методы включают в себя метод отверстий в сочетании с лазерной интерферометрией для исследования остаточных напряжений и зеркально-оптический метод для исследования остаточных деформаций.

Научная новизна. В результате выполненных исследований разработаны алгоритмы расчетного определения остаточных напряжений и деформаций, в том числе и объемных, в сварных узлах крановых металлоконструкций. Указанные разработки базируются на следующих новых результатах, полученных в данной работе: а) применена автоматическая конечно-элементная дискретизация сплошных трехмерных тел и пространственных соединений; б) для реализации упруго-пластических приближений использован метод начальных напряжений (МНН) в сочетании с α - ускорением сходимости итерационного процесса при постоянной матрице жесткости; в) разработана и применена процедура численного интегрирования уравнения связи между напряжениями и деформациями в форме приращение напряжений-приращение деформаций совместно с коррекцией напряжений методом радиального возврата.

Установлено, что появление объемных остаточных напряжений растяжения в протяженных сварных соединениях (стали низкоуглеродистые и низколегированные) связано с отношением ширины зоны δ_n , нагревавшейся до температуры T_y (пределной температуры упругого состояния), к толщине пластины δ . Для сварных пластин из сталей 09Г2 и Ст3 предельная величина этого отношения равна 1,2... 1,5.

Выявлено, что при значениях удельной погонной энергии сварки $q_n/\delta < 10000 \text{ Дж/см}^2$ в концевых зонах сварных соединений с короткими швами и в местах их пересечения возникают объемные остаточные напряжения растяжения значительной величины, когда компонент напряжений по толщине σ_z достигает $(0,6... 0,7)\sigma_T$.

Практическая ценность. Разработаны алгоритмы и программы

расчета напряженно-деформированного состояния узлов крановых металлоконструкций после сварки и нагружения внешней нагрузкой:

а) программа для расчета напряженно-деформированного состояния трехмерных тел и по схеме плоской деформации;

б) программа для расчета напряженно-деформированного состояния по схеме плоского напряженного состояния с учетом пространственного расположения свариваемых элементов;

С помощью разработанных программ рассчитываются напряжения и деформации, в том числе и объемные, в процессе или по окончании сварки и внешнего силового воздействия. Применение разработанных методов и программ позволяет проводить оценку несущей способности крановых металлоконструкций.

Разработаны конструктивно-технологические мероприятия, способствующие повышению несущей способности металлоконструкций кранов при эксплуатации.

Реализация результатов работы. Результаты теоретического и экспериментального исследования образования остаточных напряжений и деформаций, а также конструктивно-технологические мероприятия, направленные на повышение несущей способности крановых металлоконструкций, использованы в ПО "ПОДЪЕМНИК", г. Ташкент.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на ежегодных научных семинарах кафедры "Подъемно-транспортные машины и оборудование" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1983, 1984, 1985 гг.), на конференции молодых ученых МВТУ им. Н.Э. Баумана (1984 г.), на Всесоюзной научной конференции "Новое в подъемно-транспортной технике" (1985 г.), на Техническом Совете ПО "ПОДЪЕМНИК" (1985 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в четырех печатных работах и одном научном отчете.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, приложения, списка литературы, включающего 144 наименования и содержит 149 страниц машинописного текста, 97 рисунков, 18 таблиц и приложения на 23 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемых задач и формулируется цель исследования.

В первой главе показано отрицательное влияние остаточных

сварочных напряжений и деформаций на несущую способность крановых металлоконструкций по первому и второму предельным состояниям, приводятся расчетные зависимости для определения пределов выносливости и дается оценка прочности сварных соединений при низких температурах с учетом влияния остаточных напряжений, отмечены основные особенности задачи определения остаточных напряжений и деформаций, а именно: сложное термонагружение, нестационарность процесса, зависимость несущей способности металла от температуры, физическая нелинейность задачи и многомерность деформационных процессов при сварочном термонагружении.

Проведен анализ существующих расчетных методов исследования сварочных напряжений и деформаций, а также путей повышения несущей способности сварных конструкций, в том числе и крановых, значительный вклад в которые внесли советские и зарубежные ученые: Г.А. Николаев, Е.О. Паток, Н.О. Ожерблом, И.П. Байкова, А.В. Вершинский, В.А. Винокуров, К.Т. Гатовский, А.Г. Григорьянц, В.С. Игнатьева, С.А. Кузьминов, С.А. Куркин, В.И. Махненко, Н.Н. Прохоров, В.М. Сагалевич, Г.Б. Талипов, И.П. Трочук, В.Андерс, Н.Боултон, М. Ватанабе, Р. Гуннерт, К. Масубуча, Д. Розенталь, Д. Радай, К. Сато, Л. Талл, Ю. Уэда и другие.

В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал о распределении остаточных напряжений и деформаций при различных условиях сварки, разработаны как достаточно строгие, так и приближенные расчетные методы. Однако экспериментальные методы не позволяют определять напряженно-деформированное состояние в глубине металла, когда один из компонентов вектора напряжений превышает предел текучести. Для аналитических методов эта задача практически трудно разрешима. Перспективным в этом отношении является использование МКЭ в трехмерной постановке в сочетании с неизотермической теорией течения.

Показано, что одним из наиболее эффективных и экономичных приемов повышения несущей способности сварных соединений являются мероприятия, основанные на снижении конструктивно-технологической концентрации напряжений.

В заключении главы сформулированы основные задачи, решаемые в диссертации:

1. Разработка расчетных методов определения остаточных напряжений и деформаций в сварных узлах крановых металлоконструкций на основе использования МКЭ в трехмерной и двумерной постановке в со-

четании с неизотермической теорией течения.

2. Создание программы расчета по разработанным алгоритмам, реализующих в едином комплексе решение следующих вопросов: дискретизацию термического цикла, автоматизацию подготовки исходных массивов расчетной процедуры МКЭ, определение полей температур, деформаций и напряжений.

3. Проведение исследования образования остаточных напряжений и деформаций, в том числе и объемных, в типовых сварных соединениях металлоконструкций кранов, определяющих их несущую способность, после сварки и нагружения, расчетной оценки влияния приварки элементов жесткости на деформативность крановых балок.

4. Разработка на основе анализа напряженно-деформированного состояния изделия конструктивно-технологических мероприятий, направленных на повышение несущей способности крановых металлоконструкций.

Во второй главе излагаются основы алгоритмов численного решения трехмерных и плоских задач неизотермического пластического течения применительно к сварочному нагреву. Были приняты следующие основные положения при создании алгоритмов (программ) для расчета напряженно-деформированного состояния тел при сварке:

1. Расчет напряжений и деформаций проводился на основе неизотермической теории течения, так как эта теория наиболее полно описывает процесс деформирования тел при сложном нагружении.

2. Принималась модель идеального упругопластического тела, удовлетворяющего критерию текучести Мизеса и теряющего упругие свойства при температуре T_y , принимаемой равной 600°C для низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

3. Принималась схематизированная зависимость предела текучести и модуля упругости от температуры.

4. Теплофизические характеристики материала принимались постоянными в определенном диапазоне температур.

Использовался МКЭ, как численный метод интегрирования дифференциальных уравнений неизотермической теории течения, в варианте перемещений.

Рассматривается упругопластическое деформирование тела, дискретизированного на объемные (тетраэдры и призмы) или плоские конечные элементы, в переменном температурном цикле и используется шаговый метод нагружения в термическом цикле, разбиение которого на отдельные моменты времени производится на основе тео-

при теплопроводности и включает моменты достижения в нагретых элементах максимальной температуры T_M и температуры T_y (если $T_M > T_y$) при нагреве и остывании.

Распределение температуры принимается по уравнениям тепловых процессов (Н.Н. Рыкалин) для мощного быстродвижущегося источника тепла с учетом ограниченности поперечного сечения (для трехмерных задач используется точечный источник, для плоских - линейный), что соответствует режимам сварки элементов крановых металлоконструкций. Температура каждого элемента полагается равной температуре его центра тяжести.

Разработан алгоритм автоматической дискретизации трехмерного тела на призматические или тетраэдральные элементы. Решение данной задачи основано на использовании топологически регулярных пространственных сеток.

Используется теория неизотермического пластического течения, построенная на основе следующих допущений:

а). Принимается, что приращение полных деформаций складывается из приращений упругих, пластических и термических деформаций

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon_e\} + \{d\epsilon_p\} + \{d\epsilon_\theta\}. \quad (1)$$

С учетом зависимости упругих параметров материала от температуры приращения упругих деформаций определяются как

$$\{d\epsilon_e\} = [D]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial [D]^{-1}}{\partial T} \{ \sigma \} dT, \quad (2)$$

где $[D]$ - матрица упругости, а $\{ \sigma \}$ - вектор-столбец приращений напряжений.

Приращения деформаций, обусловленных тепловым расширением, определяются с помощью гипотезы Неймана

$$\{d\epsilon_\theta\} = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T \alpha \cdot dT. \quad (3)$$

Здесь α - коэффициент линейного теплового расширения, а dT - приращение температуры.

б). Приращения пластических деформаций при использовании ассоциированного закона течения определяются следующим образом

$$\{d\epsilon_p\} = \lambda \cdot \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}, \quad (4)$$

где $f = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_T$ - условие текучести Мизеса, λ - неопределенный коэффициент пропорциональности, $\bar{\sigma}$ - интенсивность напряжений.

Применительно к неизотермической теории течения используется уравнение связи между напряжениями и деформациями в форме приращение напряжений - приращение деформаций

$$\{\delta_6\} = [D_{ep}] (\{\delta \xi\} - \{\delta \xi_0\}) + \{\delta h_{ep}\}, \quad (5)$$

где $[D_{ep}]$ — матрица упруго-пластичности, а вектор $\{\delta h_{ep}\}$ учитывает разгрузку элементов, нагретых выше температуры T_y .

На основе использования основных соотношений МКЭ и уравнения связи (5) получено условие равновесия упругопластического тела при сварке

$$\int [B]^T \{\delta\} dV = 0, \quad (6)$$

где $[B]$ — матрица градиентов, а $\{\delta\}$ — вектор-столбец полных напряжений.

Для реализации упругопластического приближения используется МНН (О. Зенкевич). Алгоритм МНН можно кратко представить в виде

$$\begin{aligned} \{\Delta \delta\}_i &= -[K_e]^{-1} \{\Psi\}_{i-1}, \\ \{\delta\}_i &= \{\delta\}_{i-1} + \{\Delta \delta\}_i, \\ \{\delta_6\}_i &= \{\delta_6\}_{i-1} + \{\Delta \delta_6\}_i, \\ \{\Psi\}_i &= \int [B]^T \{\delta\}_i dV. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь i означает номер итерации, $\{\Delta \delta\}$ — вектор-столбец приращений перемещений. Тем самым решение нелинейной задачи сводится к последовательности упругих задач с постоянной матрицей жесткости $[K_e]$, в отличие от метода переменной жесткости. В качестве нагрузки при этом применяется невязка условия равновесия $\{\Psi\}$ (6). На первой итерации используются накопленные значения перемещений $\{\delta\}_0$ и напряжений $\{\delta_6\}_0$, а правая часть равняется приращению температурной нагрузки. Для ускорения сходимости итерационного процесса используется метод α -ускорения при постоянной матрице жесткости, особенностью которого является то, что невязка условия равновесия вычисляется только для пластически деформированных элементов. Итерационный процесс продолжается до выполнения выбранного критерия сходимости.

Использование зависимостей типа (5) предполагает наличие какой-либо процедуры перехода элементов из упругого состояния в пластическое, то есть определение коэффициента ζ , который показывает какая часть приращения деформаций является упругой. В данной работе для определения ζ предложена расчетная процедура, основанная на применении критерия Мизеса, без использования традиционных итерационных схем, суть которой заключается в следующем. Подставляя значения компонентов вектора напряжений в точку пере-

хода $\{6_c\}$, выраженных через γ ($\{6_c\} = \{6\}_{i-1} + \gamma \{66\}_i$), в критерий текучести Мизеса $f(\{6_c\}) = 0$, получаем уравнение, решение которого позволяет определить коэффициент γ без итераций.

Для вычисления напряженного состояния конечного элемента используется соотношение (5). При этом, чтобы сделать точность подсчета напряжений независимой от приращения нагрузки, применяется численное интегрирование (5) совместно с коррекцией напряжений методом радиального возврата в конце каждого шага в виде

$$\{6\}_i^K = \{6\}_i^K \cdot 6_T / (6_T + f_i), \quad (8)$$

где K — номер шага интегрирования, $\{6\}_i^K$ — вектор-столбец напряжений в конце шага интегрирования, $f_i = f(\{6\}_i^K)$ — функция текучести.

Применение указанных новых приемов, внесенных в методы расчета остаточных напряжений и деформаций, дает значительную экономию машинного времени, обеспечивая высокую точность результатов расчета.

На основе разработанного алгоритма создана универсальная программа расчета *FEPAVSS* для ЭЕМ серии ЕС.

В третьей главе исследуется трехмерное напряженно-деформированное состояние узлов крановых металлоконструкций, которое в ряде случаев является одним из определяющих факторов, влияющих на несущую способность изделия. Рассмотрены соединения в виде протяженных и коротких швов, выполненных на пластине. Описаны некоторые особенности разработанного алгоритма и программы, проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

При рассмотрении процесса деформирования при наложении шва на пластину (сталь Ст3) были выявлены значительные поперечные деформации до 1,8% вблизи концов шва и до -1,18% в середине. Полученные решения показывают, что напряженное состояние в районе шва характеризуется положительными нормальными компонентами вектора напряжений 6_x , 6_y и 6_z . При этом только 6_x достигает либо превышает 6_T и существенно превосходит напряжения 6_y и 6_z , которые быстро убывают по мере удаления от оси шва.

Распределение поперечной усадки по толщине отличается неравномерностью, причем ее максимальное значение наблюдается на поверхности со стороны шва. Характер эпюры перемещений показывает, что пластина испытывает как поперечный, так и продольный изгиб.

Расчетными исследованиями было установлено, что в средней части пластины с протяженным швом реализуется разновидность объемной задачи — плоская деформация. При анализе влияния режимов

сварки и толщины пластины на объемность напряженного состояния в таких сварных соединениях применялась схема плоской деформации ($\epsilon_x = 0$). Варьировались как толщина, так и режимы сварки. В результате было установлено, что появление объемных остаточных напряжений растяжения связано с отношением ширины зоны δ_n , нагреваемой до температуры T_y , к толщине пластины δ . Для пластин из сталей Ст3 и 09Г2 предельная ширина составляет 1,2 ... 1,5. При значениях удельной погонной энергии сварки $q_n/\delta > 7800 \text{ Дж/см}^2$ величина компонента $\sigma_z < 0,15 \sigma_T$ и остаточное напряженное состояние близко к двухосному. В этом случае расчет остаточных напряжений и деформаций можно вести по схеме плоского напряженного состояния. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с расчетными и экспериментальными данными других исследователей (В.И.Махненко, В.С. Игнатьева). На основе полученных данных, зная толщину свариваемых пластин и применяя различные режимы сварки, можно управлять величиной σ_z .

Короткие прямолинейные швы в пролетной балке используются в основном для приварки каких-либо элементов жесткости (диафрагм, "петушков" и т.п.). Опыт эксплуатации крановых металлоконструкций показывает, что зоны таких соединений в сочетании с концентратором напряжений являются потенциальными очагами разрушений. С помощью программы FEPAVSS было проведено исследование остаточного напряженно-деформированного состояния пластин (09Г2) с короткими швами. В результате было установлено, что в зонах концов шва и в местах пересечения швов (при $q_n/\delta < 10000 \text{ Дж/см}^2$) возникают объемные напряжения растяжения значительной величины (рис.1), что способствует появлению разрушений в этих зонах при пониженной пластичности металла (Е.М.Концевой). Выявлена также концентрация остаточных деформаций в концевых зонах таких соединений.

Для повышения несущей способности крановых металлоконструкций с такими сварными соединениями предлагается способ приварки элементов жесткости, основанный на разделении технологического и конструктивного концентраторов, путем вывода концов шва за пределы элемента жесткости на определенное расстояние, которое устанавливается расчетом. При этом конструктивный концентратор располагается в зоне, где имеют место незначительные сдвиговые деформации и остаточное напряженное состояние характеризуется невысокими значениями напряжений σ_y и σ_z .

Экспериментальное исследование статической прочности образцов из стали 09Г2С толщиной 16 мм, выполненных предлагаемым способом

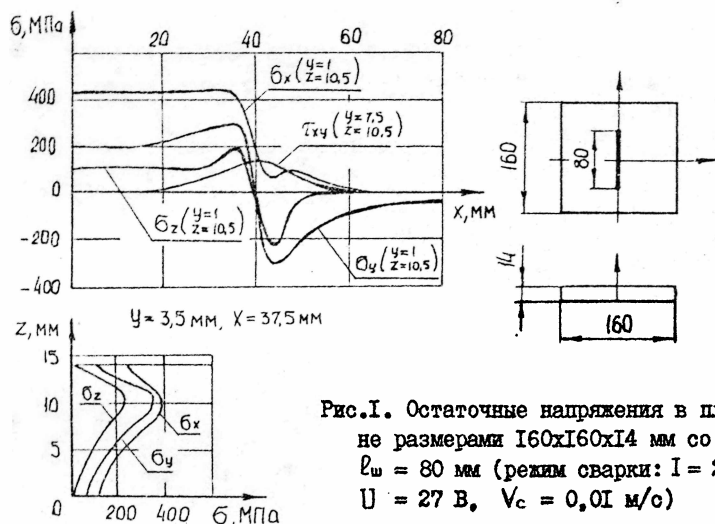


Рис.1. Остаточные напряжения в пластине размерами 160x160x14 мм со швом $l_w = 80$ мм (режим сварки: $I = 280$ А, $U = 27$ В, $V_c = 0,01$ м/с)

(тип 1) и по обычной технологии (тип 2), с исходными дефектами типа трещин показало, что разрушающие напряжения повышаются для образцов типа 1 в зависимости от температуры испытаний (до 33% при $T = -55^\circ\text{C}$).

Проведен анализ перераспределения остаточных напряжений после нагружения пластин внешней нагрузкой. Установлено, что уровень снижения остаточных напряжений зависит от величины и направления внешней нагрузки. Выявлено, что при действии растягивающей нагрузки суммарные напряжения могут достигать значительных величин (до $1,6\sigma_T$).

Расчетными исследованиями показано, что при $q_n/\delta \geq 10000$ Дж/см² определение напряженно-деформированного состояния пластин с короткими швами можно приближенно вести по схеме плоского напряженного состояния.

Для оценки достоверности полученных теоретических результатов было проведено экспериментальное исследование остаточных напряжений и деформаций. Для определения остаточных напряжений использовался метод отверстий в сочетании с лазерной интерферометрией (А.А. Антонов). Экспериментальное исследование проводилось на установке ИПМ АН СССР. В результате было установлено наличие гра-

диента напряжений σ_x и σ_y по толщине сварного соединения, который снижается с увеличением q_n/δ . Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что абсолютная погрешность расчетного метода не превышает погрешности эксперимента.

Для исследования остаточных деформаций использовался зеркально-оптический метод (П. Данто, Б.С. Касаткин). Создана экспериментальная установка, получена уточненная формула для определения углов ψ поворота нормалей к поверхности объекта. Оценена погрешность определения ψ , которая не превышает 5% при принятых параметрах установки ($H = 1,345$ м и $C = 0,08$ м). Проведено исследование образования изгибных остаточных деформаций при наплавке прямолинейных швов. Установлено, что поле изгибных деформаций в основном формируется в период выравнивания температуры по толщине.

Результаты экспериментального исследования остаточных напряжений и деформаций подтверждают полученные теоретические данные (расхождение их не превышает 10-15%).

В четвертой главе рассмотрены особенности алгоритма и программы расчета напряженно-деформированного состояния сварных пространственных узлов крановых металлоконструкций по схеме плоского напряженного состояния. Исследовано влияние приварки диафрагм на точность изготовления крановых балок.

На основе расчетных экспериментов были приняты правила имитации образования сварного соединения, которая осуществляется наложением дополнительных граничных условий $\Delta U_i = \Delta U_j$, где ΔU_i и ΔU_j — приращения продольных перемещений узловых точек, принадлежащих граничным элементам. Для учета таких граничных условий разработана специальная процедура, основанная на использовании матрицы индексов.

С учетом выше сказанного создан алгоритм автоматической разбивки на треугольные элементы листовых пространственных соединений. Разработана универсальная программа расчета остаточных напряжений и деформаций в сварных пространственных узлах металлоконструкций кранов ГЭСАР55 для ЭВМ серии ЕС.

Проведено исследование образования остаточных напряжений и деформаций в тавровых соединениях крановых металлоконструкций. Полученные решения показывают, что вследствие изгиба тавров от нецентрального по отношению к оси приложения осадочной силы, продольные напряжения в стенке дважды меняют знак, что согласуется с известными экспериментальными данными (В.А. Винокуров). Выявле-

ны остаточные поперечные деформации в полке до $-1,1\%$ и в стенке до $-1,6\%$. Установлено, что возможность взаимного влияния сварных швов на величину и характер распределения остаточных напряжений и деформаций в полке при приварке диафрагм в значительной степени зависит от расстояния между ними l_2 , и при $l_2 > l_m$ она практически исключается.

Определены размеры области соединения с короткими швами, где локализируются значительные остаточные деформации и высокие остаточные напряжения, что позволяет обоснованно применять принцип Сен-Венана.

Проведена расчетная оценка влияния остаточных напряжений при приварке элементов жесткости обычным способом и рекомендуемым (глава 3) на пределы выносливости σ_{Rk} сварных соединений, для чего использовались существующие методики расчета σ_{Rk} (Клыков Н.А., Юшкевич В.Н.). Установлено, что наличие напряжений растяжения в ряде случаев приводит к снижению σ_{Rk} , причем величина снижения зависит от уровня остаточных напряжений и вида напряженного состояния. Применение рекомендуемых мероприятий (глава 3) приводит к повышению пределов выносливости σ_{-1k} сварных соединений с короткими швами до 20-28%. Годовой экономический эффект от использования этих мероприятий на один мостовой кран в среднем составляет 10 руб.

Анализ перераспределения остаточных напряжений под действием внешней нагрузки показал, что значительные остаточные напряжения (рис.2), способные влиять на несущую способность сварных соединений, могут сохраняться при интенсивности внешней нагрузки до $0,8 \cdot \sigma_B$, что согласуется с экспериментальными данными других исследователей (В.С. Игнатьева).

Определено влияние приварки диафрагм к вертикальным стенкам балки на общие деформации в виде остаточного прогиба в вертикальной плоскости. На первом этапе исследования установлены соотношения для определения минимального размера части балки l_m , в пределах которой имеет место стабилизация поперечной усадки и углов поворота поперечного сечения балки ψ_z и ψ_y . Выявлено, что порядок и расположение прихваток, которыми соединяют полку и стенку, при приварке диафрагм влияют на величину и распределение остаточных напряжений. Используя рекомендуемые схемы расположения прихваток, поперечные напряжения в стенке можно снизить на 25-40%, а касательные на 10-16%.

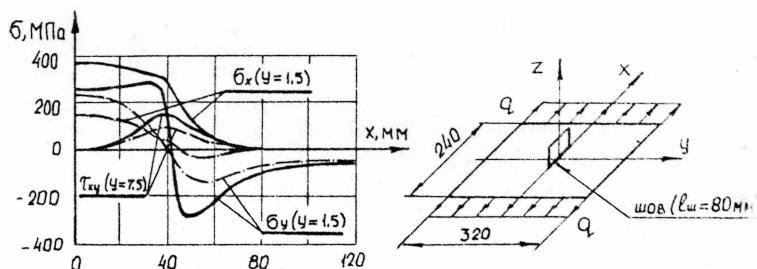


Рис.2. Остаточные напряжения в пластине размерами 240x320x8 мм (О9Г2) при приварке элемента жесткости 80x80x5 мм (режим сварки: $I = 200$ А, $U = 27$ В, $V_c = 0,0058$ м/с): — после сварки, — — — после приложения нагрузки $Q = 0,86\tau$.

Влияние приварки диафрагм на общие деформации изгиба балок достаточно заметно; величина прогиба в середине пролета главных бал составляет 10–20% от величины строительного подъема. Полученные результаты показывают удовлетворительную согласованность с экспериментами на натурных конструкциях.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе обобщения опыта эксплуатации и анализа причин разрушений были выявлены основные особенности влияния остаточных напряжений и деформаций на несущую способность крановых металлоконструкций по первому и второму предельным состояниям.

Установлено, что наиболее эффективными и экономичными приемами повышения несущей способности узлов крановых металлоконструкций являются мероприятия, основанные на снижении конструктивно-технологической концентрации напряжений в зонах сварных соединений.

2. Разработано несколько алгоритмов решения задачи о сварочных напряжениях и деформациях в зависимости от вида напряженного состояния. В основу этих алгоритмов положен МКЭ в сочетании с теорией неадиабатического пластического течения. Указанные раз

работки базируются на следующих новых результатах, полученных в данной работе: 1) применена автоматическая конечно-элементная дискретизация сплошных трехмерных тел и пространственных соединений; 2) для реализации упруго-пластического приближения использован МНН в сочетании с α -ускорением сходимости итерационного процесса при постоянной матрице жесткости конструкции; 3) разработана и применена процедура численного интегрирования уравнения связи в форме приращение напряжений - приращение деформаций совместно с коррекцией напряжений методом радиального возврата.

3. Созданы универсальные программы расчета остаточных напряжений и деформаций, в том числе и объемных, на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV применительно к ЭЕМ серии ЕС.

Достоверность результатов расчета подтверждена численными экспериментами по оценке сходимости алгоритмов, сравнением с расчетными и экспериментальными исследованиями других авторов и сопоставлением с экспериментальными данными, полученными в работе.

4. С помощью разработанных методов расчета исследовано напряженно-деформирующее состояние ряда сварных узлов крановых металлоконструкций.

Показано, что при односторонней сварке возник в средней части пластины реализуется разновидность объемной задачи - плоская деформация. Выявлены значительные остаточные деформации в поперечном по отношению к шву направлении (для стали Ст3 до 1,8% у концов и -1,18% в середине), локализованные в узкой зоне, прилегающей к шву.

5. Установлено, что возможность возникновения объемных напряжений растяжения в протяженных сварных соединениях связана с отношением ширины зоны δ_n , нагревавшейся до температуры T_y , к толщине пластины δ . Для пластин из стали Ст3 и 09Г2 предельная ширина этой зоны равна 1,2 ... 1,5. При значениях удельной погонной энергии сварки $q_n/\delta > 7800 \text{ Дж/см}^2$ величина $\delta_n < 0,15 \delta$, и расчет можно вести по схеме плоского напряженного состояния.

6. Выявлено, что в зонах концов коротких швов и в местах их пересечения возникают объемные напряжения растяжения заметной величины (при $q_n/\delta < 10000 \text{ Дж/см}^2$), что способствует появлению разрушений в этих зонах при недостаточной пластичности металла.

Установлено, что при отношениях $q_n/\delta > 10000 \text{ Дж/см}^2$ рас-

чет напряженно-деформированного состояния пластин при наложении короткого шва можно приближенно вести по схеме плоского напряженного состояния.

7. Выявлено, что взаимное влияние сварных швов на величину и характер распределения остаточных напряжений и деформаций в полке или приварке диафрагм зависит от расстояния между ними ℓ_d , и при ℓ_d , большем длины шва ℓ_w , оно практически исключается.

Определены размеры области соединений с короткими швами ($B \times L$), где локализируются значительные остаточные деформации и высокие остаточные напряжения, что позволяет обоснованно применять принцип Сен-Венана для выбора размеров расчетной зоны.

8. Определено влияние приварки диафрагм к вертикальным стенкам балки на общие деформации в виде остаточного прогиба в вертикальной плоскости. Даны рекомендации по обоснованному выбору размеров части балки ℓ_m для решения термомеханической задачи. Выявлено, что при приварке диафрагм порядок и расположение прихваток между полкой и стенкой влияют на величину остаточных напряжений в стенке. Применение рекомендуемых схем расположения прихваток позволяет снижать поперечные напряжения на 25-40%, а касательные на 10-16%.

Результаты расчетов деформативности балок удовлетворительно сходятся с экспериментами на натурных конструкциях.

9. Изучено изменение остаточных напряжений при взаимодействии их с напряжениями от внешней нагрузки в условиях сложного напряженного состояния. Значительные остаточные напряжения, оказывающие влияние на несущую способность сварного соединения, могут сохраняться при интенсивности внешней нагрузки до 0,8 σ_T .

10. Разработаны способы приварки элементов жесткости короткими угловыми швами в несущих крановых металлоконструкциях, основанные на разделении конструктивного и технологического концентраторов. Применение их позволяет повысить прочность при пониженных температурах (до 33%) и пределы выносливости (на 20-28%) сварных соединений крановых металлоконструкций.

Годовой экономический эффект от использования этих мероприятий на один кран в среднем составляет 10 руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Вершинский А.В., Нургузин М.Р. Объемные остаточные напряжения и деформации при сварке листовых элементов крановых металлоконструкций. - Новое в подъемно-транспортной технике: Тезисы Всесоюзной научной конференции. М., 1985, с.45.

2. Вершинский А.В., Нургузин М.Р., Базарбаев С.С. Определение объемных остаточных напряжений и деформаций в сварных узлах крановых металлоконструкций. - Труды/МВТУ, 1985, № 438, с.97-113.

3. Нургузин М.Р., Сивоглазов А.С., Базарбаев С.С. Применение метода конечных элементов для расчета крановых металлоконструкций. - Известия вузов. Машиностроение, 1985, № 7, с.160.

4. Нургузин М.Р. Определение остаточных деформаций и напряжений при приварке элементов жесткости в балках мостовых кранов. - Известия вузов. Машиностроение, 1985, № 10, с.104-108.

Муромцев

Объем I п.л. Тираж 100 экземпляров. Типография МВТУ.

Л-97631. Зак.1250. Подписано к печати 05.II.85 г.

