

М 431288

Государственный комитет по народному образованию СССР

Московский
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени
Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи
УДК 621.874.

ХОДЖАЕВ Улугбек Тауфикович

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИИ КРАНОВ ФЕРМЕННОГО ТИПА

Специальность 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

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном
Техническом Университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ВЕРШИНСКИЙ А.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ИГНАТЬЕВА В.С.
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
КЛАШАНОВ Ф.К.

Ведущее предприятие - ВКТИМОНТАЖСТРОЙМЕХАНИЗАЦИЯ, г. Москва.

Защита диссертации состоится "1" сентября " 1990 г.
на заседании Специализированного Совета К.053.15.10 МГТУ имени
Н.Э. Баумана по адресу:
ком 5.

Библиотеке МГТУ имени

"12" 1990 г.

печатью, просьба

В.С. ЦЫБИН

М 491288

имени Н.Э. Баумана
06.07. 1990 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Одна из главных задач, стоящих перед народным хозяйством - это повышение надежности вновь создаваемых и проектируемых машин при одновременном решении проблем повышения производительности общественного труда, уровня автоматизации и механизации производства. Одним из путей решения этой важнейшей задачи является создание более надежных, производительных и экономичных подъемно-транспортных машин (ПТМ), что во многом определяется несущей способностью их металлических конструкций.

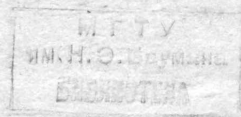
В проблеме повышения ресурса и надежности машин и конструкций в настоящее время наряду с другими сформулировалось направление по многокритериальным подходам при расчетах и исследованиях несущей способности сварных металлических конструкций (К.В. Фролов).

В настоящее время одной из важнейших задач в области исследования прочности крановых металлоконструкций является задача анализа несущей способности сварных узлов. Узловые фасонки крановых металлических конструкций ферменного типа являются одними из наиболее часто повреждаемых, причем каждое разрушение приводит к необходимости длительного и дорогостоящего ремонта.

При расчетах ферменных металлических конструкций в большинстве случаев принимаются упрощающие положения закрепления стержневых элементов в узловой фасонке, однако обоснованно применять допущение о характере взаимодействия входящих в сварное соединение элементов возможно только на основе уточненных исследований поведения таких узлов в процессе рабочего нагружения, что определяет необходимость создания соответствующей методики.

Таким образом, исследования в области изучения несущей способности сложных сварных узлов, позволяющие создать инженерные методы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных соединений на фасонке являются актуальными, т.к. направлены на повышение надежности и работоспособности несущей металлической конструкции кранов в целом.

Цель работы. Создание расчетной методики определения НДС сложных узлов крановых металлических конструкций ферменного типа, основанной на применении численных методов и учете действия основных факторов, связанных как с конструкцией сварного



соединения и технологией его изготовления, так и с условиями эксплуатации.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на использовании основных положений теории нестационарной теплопроводности и представлений классических теорий деформаций и напряженного состояния твердого деформируемого тела, в качестве расчетного численного метода применен метод конечных элементов (МКЭ).

Экспериментальные исследования заключались в определении перемещений и деформаций отдельных точек сварного соединения и проводились на специальном стенде с применением стандартной измерительной аппаратуры.

Научная новизна. Разработана расчетная методика и построен алгоритм оценки НДС сложных узлов крановых металлических конструкций ферменного типа с учетом влияния основных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на характер распределения и уровень напряжений и деформаций в сварном соединении. В основу математической модели алгоритма расчета заложено использование численных методов, и в частности МКЭ, для определения трехмерных температурных полей в процессе сварки путем решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности; применение двадцатиузловых изопараметрических конечных элементов и теории неизотермического пластического течения для уточненного решения упругопластической задачи деформирования сварных соединений во время изготовления и после приложения внешней нагрузки.

С помощью разработанной расчетной методики проведены комплексные исследования и выявлен ряд особенностей НДС узлов кранов, связанных с зависимостью характера распределения и конструкции сварного соединения, механических и теплофизических характеристик металла, режимов сварки, величины и сочетания эксплуатационных нагрузок.

Исследован процесс совместного деформирования пластины узловой фасонки с приваренным элементом решетки во время приложения рабочей нагрузки. На основании анализа результатов расчетов проведена оценка зависимости жесткости сварного соединения от геометрии и технологии изготовления сложного узла

ферменной металлической конструкции.

Практическая ценность работы. На основе теоретических разработок создан единый комплекс программ, ориентированный на использование вычислительной техники, предназначенный для уточненного расчета НДС сложных сварных соединений узлов ферменных металлических конструкций кранов и включающий в себя:

- программу определения нестационарных температурных полей в трехмерном теле в процессе наложения сварных швов и последующего остывания;

- программу, реализующую решение упругопластической задачи с целью определения а) объемных остаточных напряжений и деформаций после сварки; б) НДС узла, возникшего в результате сложного деформирования металла в процессе приложения рабочей нагрузки.

Разработаны и обоснованы расчетом конструктивно-технологические мероприятия, направленные на повышение несущей способности узлов на фасонке, заключающиеся в рациональном конструктивном оформлении соединения и выборе режимов сварки.

Достоверность полученных результатов. Научные положения и выводы, полученные в ходе исследований, достаточно строго обоснованы и базируются на фундаментальных положениях теории теплопроводности, закономерностях механики твердого деформируемого тела. Достоверность полученных результатов обеспечивается обоснованным выбором расчетных схем, принятием допущений при теоретических и экспериментальных исследованиях, решением ряда тестовых задач с широким использованием ЭВМ на всех этапах работы, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы в виде разработанного программного обеспечения, а также конкретных конструктивно-технологических рекомендаций приняты к использованию в производственном объединении "Подъемник" (г. Ташкент) при проектировании и изготовлении металлических конструкций козловых кранов, а также в учебном процессе кафедры "Подъемно-транспортные машины и робототехнические комплексы" МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на ежегодных научных семинарах кафедры "Подъемно-транспортные машины и робототехнические комплексы" МГТУ имени Н.Э. Баумана (1987-1990 г.г.), на научно-технических советах

производственного объединения "Подъемник" (г. Ташкент), на Всесоюзной конференции "Проблемы развития и совершенствования подъемно-транспортной техники", г. Красноярск, май 1988 г., на научно-технической конференции молодых ученых и специалистов факультета "Робототехника и комплексная автоматизация" МГТУ им. Н.Э. Баумана, май 1988 г., на научно-технической конференции молодых ученых и специалистов "Применение САПР и микропроцессорной техники при создании подъемно-транспортного оборудования", Москва, май 1989 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в четырех печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы и содержит: 148 страниц машинописного текста, 9 таблиц, 78 рисунков и списка литературы из 124 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность рассматриваемой проблемы, приведено краткое содержание выполненных автором исследований.

В I-ой главе представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований в области изучения работоспособности сварных узлов металлических конструкций. С этой целью рассмотрены работы Николаева Г.А., Вершинского А.В., Гохберга М.М., Игнатьевой В.С., Концегова Е.М., Ряхина В.А., Сагалева В.М., Masubuchi K. и др. Анализ отказов и разрушений металлоконструкций кранов ферменного типа показал, что наиболее часто трещины обнаруживаются в узловой фасонке, которая является местом сопряжения пересекающихся стержневых элементов решетки, и характеризуется достаточно сложным НДС, определяемым концентрацией рабочих и остаточных сварочных напряжений.

Все возрастающие требования к надежности крановых металлических конструкций вызывают необходимость создания инженерных методов расчетной оценки полей напряжений и деформаций от сварки и рабочей нагрузки в конструктивных сварных элементах, с учетом совместного влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик узла на фасонке на несущую способность сварного соединения.

Сложность оценки работоспособности узловых фасонек ферменных металлических конструкций состоит в том, что алгоритм решения задачи включает в себя несколько этапов. На I-ом шаге предложенной последовательности исследований ставится задача определения зон с высоким уровнем остаточных растягивающих напряжений после сварки в сочетании с пиками напряжений, обусловленных геометрией входящих в узел элементов. Т.е. для того, чтобы определить НДС сварного узла в целом надо оценить составляющие его компоненты: поля остаточных деформаций и напряжений, сформировавшегося в процессе сварочного нагрева и последующего остывания во время изготовления конструкции и поле напряжений от внешних эксплуатационных нагрузок.

Комплексность исследуемой проблемы определила необходимость применения численных методов при изучении тепловых процессов и взаимодействия остаточных напряжений и деформаций с эксплуатационной нагрузкой. В связи с появлением мощных ЭВМ среди численных методов решения задач механики твердого деформируемого тела получил МКЭ.

Для рассматриваемого круга задач о напряжениях и деформациях в сварных узлах металлических конструкций МКЭ был применен Махненко В.И., Касымбековым Ж.Н., Киселевым С.Н., Нургужиным М.Р. и др.

Вопрос о концентрации напряжений в сварных соединениях узлов на фасонке с продольными угловыми швами после приложения внешней нагрузки рассматривался во многих работах, посвященных изучению проблем прочности металлических конструкций. Сюда наряду с вышеуказанными следует отнести исследования таких авторов как Гукова М.Н., Мелкумян В.С., Новиков Ю.А., Селиванов М.И., Шнюков В.С. и др.

Обзор литературы показал, что в большинстве случаев используемые в инженерной практике схемы расчета сварных соединений основываются на ряде значительно упрощающих задачу допущениях. Поэтому становится актуальным создание направленной на практическое применение расчетной методики оценки несущей способности сложных сварных узлов ферменных металлических конструкций кранов. При этом должно быть учтено влияние на НДС условий изготовления, конструкции узла и характера его эксплуатации.

Во второй главе приведены основные положения методики численного решения объемной упругопластической задачи определения напряжений и деформаций в сложных сварных узлах крановых металлических конструкций ферменного типа в процессе их изготовления и эксплуатации.

Последовательность исследований действительной работы узла на фасонке определяет необходимость получения на I-ом этапе исчерпывающей информации о НДС соединения в процессе сварки. Формирования полей остаточных сварочных напряжений является результатом действия сложных процессов упругопластического деформирования, вызываемого неравномерностью распределения температуры отдельных точек соединения в термическом цикле сварки.

С целью определения трехмерного нестационарного поля предложен численный метод решения дифференциального уравнения теплопроводности (I), разработанный на основе положения теории теплообмена с учетом условий сварки и с использованием МКЭ.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (1)$$

где $c\rho$ - объемная теплоемкость, λ - коэффициент теплопроводности, T - температура, Q - удельная мощность источника теплоты.

Физический подход к решению нестационарной температурной задачи МКЭ следующий: весь период нагрева и остывания разбивается на отдельные этапы и последовательно определяется температура в отдельных дискретных зонах изделия в каждый момент времени.

Для расчетов температур использовался трехмерный тетраэдральный конечный элемент с плоскими гранями и четырьмя узлами, расположенными в вершинах.

На основе разработанного алгоритма была составлена программа **TERMO** на алгоритмическом языке **FORTRAN** для ЭВМ серии ЕС.

В ходе разработки алгоритма и создания программы проанализированы различные факторы, оказывающие значительное влияние на точность вычислений температурных полей МКЭ, например такие, как способ аппроксимации соединения сеткой конечных элементов, метод моделирования теплового процесса по времени, соотношение между линейными размерами конечных элементов и шагом по времени для решения нестационарной задачи.

В результате предложены две схемы конечно-элементной

дискретизации пластины в зоне сварных швов и высоких градиентов температур, обосновано, что размер конечных элементов должен находиться в пределах от 5 до 20 мм, при этом критическое значение шага по времени не должно превышать 0.5 с. Решение тестовых задач показало, что использование схемы Кранка-Николсона для численного интегрирования уравнения нестационарного теплового процесса позволяет получать наиболее точные результаты.

Исследована возможность принятия допущения о независимости теплофизических характеристик (ТФХ) материала от температуры. На основании анализа результатов вычислительных экспериментов обосновано допущение о постоянстве ТФХ в рассматриваемых диапазонах температур.

Расчет температурных полей является необходимым шагом в алгоритме оценки НДС сварных узлов крановых металлических конструкций ферменного типа в процессе их изготовления. На следующем этапе последовательности исследований решена задача по определению напряжений и деформаций, сформировавшихся в ходе упругопластического деформирования металла при переменных температурах и внешней нагрузке.

Методика расчета НДС сложных сварных узлов базируется на следующих основных положениях:

1. Применяется МКЭ, как численный метод решения сложных задач механики твердого деформируемого тела (МТДТ). При этом сварное соединение аппроксимируется двадцатиузловыми изопараметрическими конечными элементами. Использован вариант МКЭ, известный как метод перемещений, заключающийся в том, что функции перемещений однозначно определяют деформации внутри элемента. В этом случае метод эквивалентен минимизации потенциальной энергии системы, выраженной через поле перемещений.

2. Расчет напряжений и деформаций в процессе сварки и во время приложения нагрузки проводится на основе теории неизотермического пластического течения, при этом принимается модель идеально упругопластического тела, удовлетворяющего критерию текучести Губера-Мизеса.

3. Принимается ряд допущений, связанных:

а. с схематизированной зависимостью механических и теплофизических характеристик от температуры, т.е. материал сохраняет свои упругие свойства до температуры $T_y = 600^\circ\text{C}$, а после

- достижения этой температуры модуль упругости E и предел текучести σ_T становятся равными 0;
- б. с деформационной изотропией свойств;
- в. постоянством свойств материала по объему конечного элемента.

Отличительной особенностью двенадцатиугольного изопараметрического конечного элемента является то, что он обладает большим числом степеней свободы, и поле перемещений внутри элемента аппроксимируется полином второй степени, что определяет эффективность его применения для уточненных расчетов НДС сложных сварных узлов. Обобщенная формула для описания функций форм такого элемента в безразмерных координатах ξ, η, ζ имеет вид:

$$N_r(\xi, \eta, \zeta) = \frac{3\xi^2\eta^2\zeta^2 - 2}{8} \left[\xi^2\eta^2\zeta^2(1+\xi\xi_r)(1+\eta\eta_r)(1+\zeta\zeta_r) - \right. \\ \left. - \xi^2\eta^2(1+\xi\xi_r)(1+\eta\eta_r)(1-\zeta^2) + \eta^2\zeta^2(1+\eta\eta_r)(1+\zeta\zeta_r)(1-\xi^2) - \right. \\ \left. - \xi^2\zeta^2(1+\xi\xi_r)(1+\zeta\zeta_r)(1-\eta^2) \right] \quad (2)$$

Пример дискретизации фрагмента узловой фасонки с помощью двенадцатиугольных изопараметрических конечных элементов показан на рис. 1.

Расчетная методика решения упругопластической задачи деформирования сварного соединения в процессе изготовления и внешнего нагружения базируется на следующих основных положениях теории неизометрического пластического течения:

1. Приращение полной деформации представляется в виде суммы

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon\}_e + d\{\varepsilon\}_p + d\{\varepsilon\}_\theta \quad (3)$$

приращений упругой $d\{\varepsilon\}_e$, пластической $d\{\varepsilon\}_p$ и температурной $d\{\varepsilon\}_\theta$ составляющих вектора деформаций.

2. Текучесть начинается тогда, когда напряжения $\{\sigma\}$ удовлетворяют критерию текучести Губера-Мизеса:

$$f = \bar{\sigma} - \sigma_T(T) = 0 \quad (4)$$

где f - функция текучести, $\sigma_T(T)$ - предел текучести материала, $\bar{\sigma}$ - интенсивность напряжений.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} / 2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (5)$$

3. Используется гипотеза ассоциированного закона течения, согласно которой приращение вектора пластических деформаций пропорционально

вектору производной функции текучести по напряжениям:

$$d\{\varepsilon\}_p = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} = \lambda \{a\} \quad (6)$$

где λ - некоторый неотрицательный скалярный множитель.

При решении упругопластической задачи МКЭ используется итерационный метод начальных напряжений, в котором путем последовательных приближений удовлетворяется условие равновесия тела в процессе сварки и таким образом решение физически нелинейной задачи сводится к последовательности упругих задач с постоянной матрицей жесткости.

Применение МКЭ для задач МТДТ приводит к разрешающим системам линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые имеют высокий порядок (до 3000 - 4000 неизвестных). Основное достоинство метода Холецкого для решения больших СЛАУ, заключающееся в сравнительно малых затратах машинного времени при высокой точности вычислений, преопределило его использование при создании алгоритма программы STRESS для определения полей напряжений и деформаций сложного соединения после сварки и в процессе нагружения.

На основе представленных положений была разработана методика, построены алгоритмы и создан комплекс программ для уточненного расчета НДС узлов на фасонке ферменных крановых металлических конструкций на всех этапах его изготовления и эксплуатации.

Эффективность предложенной методики и точность вычислений по разработанным программам были оценены путем решения ряда тестовых задач, а также сравнением с результатами, полученными другими авторами.

В третьей главе представлены результаты исследования механизма образования остаточных напряжений и деформаций после сварки узлов на фасонке ферменных металлоконструкций кранов.

С помощью разработанного программного комплекса моделировались тепловые и деформационные процессы в сложном сварном соединении. Основная расчетная схема представляет из себя жестко закрепленную по задней кромке пластину с наложенными на нее сварными швами. В число исходных данных для расчетов входят геометрические и механические характеристики сварного соединения, теплофизические константы материалов, режимы сварки.

Была решена задача о сварочных напряжениях и деформациях для

следующих основных схем сварных соединений:

1. Наложение на поверхность пластины одного шва по незамкнутому контуру - имитировалась приварка стойки к узловой фасонке или стенке пояса; при этом рассматривались случаи а.) одновременной и б.) последовательной укладки фланговых и лобового шва, составляющих шов по незамкнутому контуру (пример распределения 3-х нормальных компонент остаточных напряжений в сечении пересекающем фланговые швы для случая - а - показан на рис. 2);
2. Наложение на верхнюю и нижнюю поверхность пластины двух швов - для случая двусторонней приварки к пластине элементов решетки;
3. Приварка двух элементов решетки - раскосов к пластине с целью исследования влияния конструктивного оформления, в частности расстояния между двумя швами по незамкнутому контуру, на уровень и характер распределения остаточных напряжений;
4. Наложение трех швов по незамкнутому контуру на поверхность пластины с целью исследования термдеформационных процессов в сложном узле на фасонке, в котором стержневые элементы раскосов и стоек соединяются с поясами; для этой схемы рассматривались а.) различные варианты последовательности укладки сварных швов при приварке к пластине элементов решетки и б.) вариант, когда производилась сварка пластин различных толщин при переменных технологических параметрах - мощности источника нагрева и скорости сварки.

Таким образом, исследован механизм образования полей остаточных сварочных напряжений и деформаций в сложных узлах крановых металлоконструкций в процессе изготовления. Выявлен ряд особенностей НДС, связанных с зависимостью характера распределения и уровня остаточных напряжений и деформаций от геометрии сварного соединения, технологических режимов сварки, механических характеристик материалов. Среди этих особенностей следует отметить:

- а). объёмность остаточного сварочного НДС в зонах сближения, пересечения и окончания швов по незамкнутому контуру в сложных узлах на фасонке крановых решетчатых металлоконструкций; при этом в указанных зонах в глубинных слоях привариваемых элементов величина одной из компонент вектора напряжений σ_x может заметно превышать предел текучести материала (до $1.6 \sigma_T$) при толщине $\delta = 30 \text{ мм}$ и удельной погонной энергии сварки $q_n / \delta = 4.9$.

10^7 Дж/м², материал - сталь 09Г2С), а значения двух других нормальных составляющих σ_y и σ_z достигают σ_z в этом случае величин 0.75 и 0.55 σ_T соответственно.

б) большую неравномерность распределения напряжений и деформаций по трем измерениям; показано, например, что в зонах сварного соединения узловой фасонки с приваренным одним элементом-стойкой или расколом на расстоянии 20 - 30 мм от сварных швов достигаются максимальные величины напряжений и пластических деформаций.

Выявлено, что сближение нескольких угловых швов по незамкнутому контуру в случае приварки к пластине трех элементов решетки приводит к увеличению размеров зоны высоких значений остаточных растягивающих напряжений и пластических деформаций; на основании анализа результатов проведенных исследований показано, что увеличение расстояния между сварными швами с 40 до 100 мм уменьшает размеры зоны с остаточными напряжениями, превышающими $0.7 \sigma_T$, с 50 мм в первом случае до размера зоны, нагревающейся до температуры потери упругих свойств T_y (около 30 мм) во втором (при увеличении погонной энергии сварки $q_n/\delta = 4.5 \cdot 10^7$ Дж/м²).

Проанализирован процесс образования полей остаточных напряжений и деформаций при приварке элементов решетки с одной или с двух сторон к узловой фасонке. На основании сравнения двух вариантов схем наложения угловых швов по незамкнутому контуру показано, что в случае укладки шва на одну сторону пластины возникновение усталостного или хрупкого разрушения возможно в большей степени вследствие появления зон высокой концентрации напряжений.

На основании оценки влияния порядка наложения швов при приварке элементов решетки к узловой фасонке установлено, что результирующие значения остаточных напряжений мало зависят от указанного фактора. Выявлено, что при изменении порядка наложения швов возможно перераспределение напряжений в ходе сварки, что может привести к изменению характера распределения остаточных напряжений; показано, что максимальные значения отличаются для разных вариантов не более, чем на 15-20 %.

В 4-ой главе проанализирована действительная работа сварного соединения в процессе эксплуатационного нагружения.

Каждый этап общей последовательности оценки НДС узлов на фасонке характеризуется своей задачей исследования, расчетными схемами, исходными данными и получаемыми результатами. В соответствии с поставленной задачей оценки зон концентрации напряжений, возникающих после приложения и снятия внешней нагрузки, в число исходных данных для расчетов наряду с геометрическими и механическими характеристиками сварного соединения входят поля остаточных сварочных напряжений и деформаций.

Повышение достоверности получаемых результатов расчетов при одновременном требовании уменьшения затрат используемой оперативной памяти и времени счета ЭВМ определяет необходимость выделения для уточненных расчетов части сварного узла, характеризуемого наибольшими градиентами исследуемых функций. Оценка границ такой области производится на основании анализа результатов определения объемного остаточного НДС, сформировавшегося после сварки и инструкции узла, после чего для дальнейших исследований выбирался участок с максимальными достигнутыми уровнями остаточных напряжений.

НДС фрагмента узла на фасонке в процессе внешнего эксплуатационного нагружения определялось для 3-х типов соединений: пластина с уголком, пластина со швеллером, пластина со сдвоенными уголками.

Исследован механизм упругопластического деформирования соединений, входящих в узел на фасонке с имеющимся полем остаточных сварочных напряжений в процессе их эксплуатационного нагружения. В результате проведена оценка влияния некоторых параметров, например таких как конструкция узла, схема наложения швов, величина и вид силового воздействия, на уровень напряжений и характер их распределения, а также на жесткость сварного соединения.

На основании анализа полученных с помощью разработанного комплекса программы результатов можно выделить несколько основных особенностей формирования НДС узлов на фасонке в процессе внешнего, среди которых следует отметить:

а) Наличие в сварном соединении полей остаточных сварочных деформаций и напряжений определяет сложный характер деформирования входящих в узел элементов в процессе приложения внешней нагрузки.

При этом увеличение хотя бы одной из компонент вектора напряжений приводит к началу пластического деформирования материала в областях, где выполняется условие текучести (4). В результате возрастают напряжения в обширных зонах сварного соединения, где их величина может достигать предела текучести материала, а в некоторых случаях значительно превышать его. Высокие (до 0,8-0,9 $\sigma_{\text{т}}$) растягивающие напряжения наблюдаются в зонах, прилегающих к концам сварных швов, между двумя близко расположенными швами, в окрестностях мест пересечения флангового и лобового швов.

б) Анализ действительной работы сварного соединения показывает значительную зависимость характера распределения напряжений под нагрузкой от конструкции узла на фасонке. При этом особое влияние оказывают схема наложения сварных швов и геометрические характеристики входящих в узел элементов. В результате совпадения участков конструктивных и технологических концентраторов вторичные остаточные напряжения в указанных областях достигают значений 320-340 МПа. Пример распределения вторичных остаточных напряжений для фрагмента сварного узла, показанного на рис.1, в зависимости от уровня достигнутой внешней нагрузки, представлен на рис.3.

в) Исследовано взаимодействие входящих в узел элементов в процессе нагружения и получено, что жесткость сварного соединения определяется совокупным влиянием факторов технологического и конструкционного характера. Перераспределения остаточных сварочных напряжений в результате рабочего нагружения вызывает пластическое деформирование материала, что приводит к значительному изменению схемы узла на фасонке и появлению дополнительных силовых факторов из-за возникшего эксцентриситета приложения нагрузок.

Экспериментальные исследования действительной работы узла на фасонке заключались в определении перемещений отдельных точек сварного соединения в процессе приложения продольной и поперечной сил, имитирующем эксплуатационное нагружение.

Сравнение результатов экспериментов, проведенных на специальном стенде в лаборатории кафедры "Подъемно-транспортные машины и робототехнические комплексы" МГТУ им.Н.С.Баумана, с величинами, полученными после расчетов по разработанным программам на ЭВМ, показало эффективность применения предложенной методики определения НДС узла на фасонке и удовлетворительную точность вычислений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показано, что проблема оценки несущей способности сложных узлов крановых металлических конструкций ферменного типа при создании изделий, отвечающих требованиям прочности технологичности, определяется необходимостью последовательного решения нескольких задач: расчет температурных полей, возникающих во время сварки, исследование процесса формирования полей остаточных сварочных напряжений и деформаций, определение зон концентрации напряжений в локальных участках сварного соединения после приложения внешней нагрузки. Выявлено, что сложный характер взаимодействия входящих в соединение элементов не всегда позволяет принимать при расчетах ферменных металлических конструкций в целом допущение о шарнирном или жестком закреплении стержней решетки в узле.

2. Разработана расчетная методика определения НДС узла на фасонке ферменной металлоконструкции, основанная на применении численного МКЭ, двадцатиузловых изопараметрических конечных элементов и теории неизометрического пластического течения, и предназначенная для поэтапного уточненного исследования напряжений и деформаций, возникающих в сложном сварном соединении в процессе его изготовления и эксплуатации.

3. Исследован механизм образования полей остаточных сварочных деформаций и напряжений в узле фасонки, в результате чего выявлен ряд особенностей остаточного НДС (таких как объёмный характер и неравномерность распределения напряжений и деформаций), связанных с зависимостью процессов упругопластического деформирования материала при переменной температуре от геометрии сварного соединения, технологических режимов сварки, механических характеристик металла.

4. На основании расчетов НДС сварных соединений с помощью разработанных программ выявлены локальные зоны упруго-пластических напряжений и деформаций, связанные с концентрацией напряжений в местах сближения нескольких сварных швов, в окрестностях точек их пересечения и у концов швов, т.е. зоны технологической и конструктивной концентрации в местах резкого изменения формы. Все перечисленные области соответствуют местам наиболее вероятного проявления разрушений в процессе эксплуатации конструкции.

5. Исследование работы узловой фасонки с приваренными элементами решетки под нагрузкой показало неравномерность распределения напряжений по длине сварного шва. В местах окончания и пересечения швов, выхода их на свободную кромку пластины отмечены высокие напряжения, значения которых превышают уровень напряжений от рабочих

нагрузок в 1.3-1.7 раза, в зависимости от схемы наложения сварных швов и геометрических характеристик входящих в узел элементов.

6. Экспериментальные исследования, проведенные с целью определения перемещений отдельных точек входящих в узловое соединение элементов подтвердили наличие особенностей НДС рассматриваемых сварных соединений и обосновали возможность применения предлагаемой расчетной методики в общем алгоритме оценки несущей способности сложных сварных узлов крановых металлических конструкций ферменного типа.

7. Показано, что использование разработанной методики, построенных алгоритмов и созданных программ позволяет проводить оценку влияния конструктивных характеристик узла на фасонке (форма, размеры, расположение швов) и различных режимов сварки на жесткость сварного соединения. Результаты таких исследований дают возможность выработать рекомендации по конструктивному оформлению и технологии изготовления сложных узлов и обоснованному применению допущений при расчетах стержневых металлических конструкций кранов.

8. Применение разработанной методики определения НДС сложных узлов и созданного комплекса программ позволило управлять характером распределения напряжений с целью снижения их отрицательного влияния, что определило использование выработанных конструктивно-технологических рекомендаций для повышения несущей способности сварных соединений при проектировании и изготовлении металлических конструкций кранов на производственном объединении "Подъемник".

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Оценка сопротивляемости сварных узлов металлоконструкций ПТМ крупным разрушениям и разработка методов повышения их несущей способности / А.В.Вершинский, Г.А.Воронцов, С.С.Базарбаев, У.Т.Ходжаев // Пробл. развития и соверш. подъем.-трансп. техн.: Тез. докл. Всес. конф., г. Красноярск, 24-26 мая 1988 г. - М., 1988. - С. 50.
2. Ходжаев У.Т. Программа расчета нестационарного температурного поля, возникающего в процессе сварки, методом конечных элементов // Изв. Вузов. Машиностроение. - 1989. - № 1. - С. 160.
3. Ходжаев У.Т. Определение термических циклов в процессе изготовления узлов крановых металлических конструкций // Изв. Вузов. Машиностроение. - 1989. - № 10. - С. 84-89.
4. Ходжаев У.Т. Определение напряженно-деформированного состояния сложных узлов крановых металлических конструкций // Изв. Вузов. Машиностроение. - 1990. - № 4. - С. 93-97.

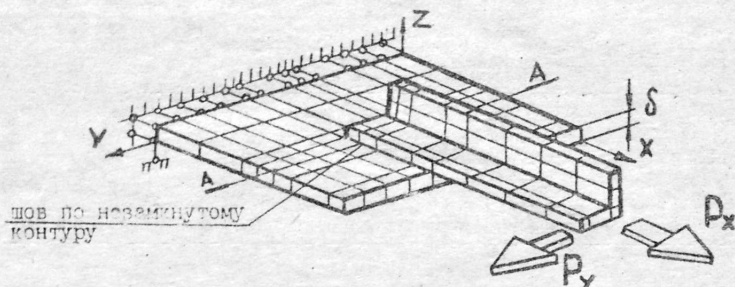


Рис. 1. Расчетная схема фрагмента сварного узла.

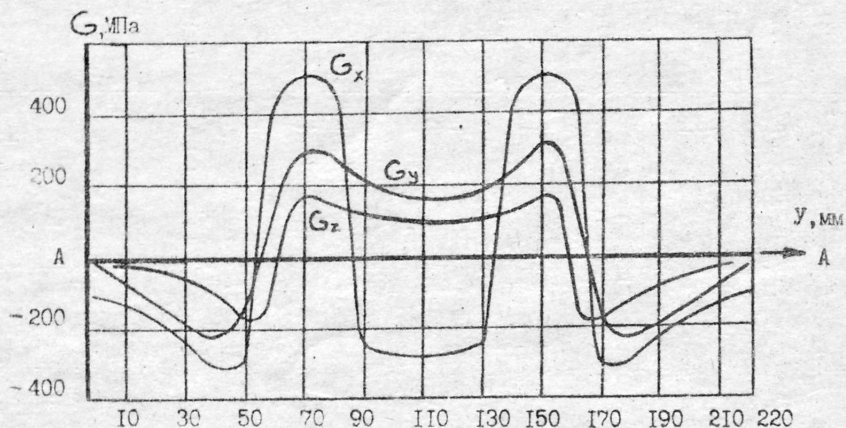


Рис. 2. Остаточные сварочные напряжения после изготовления узла на фасонке ($z = \delta/2$)

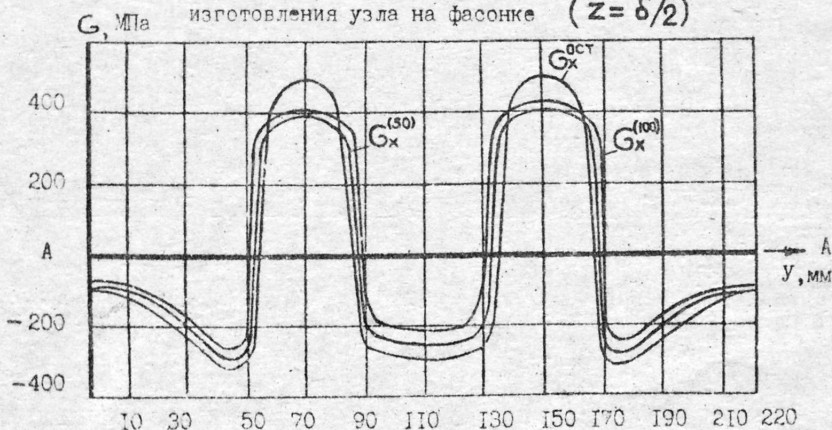


Рис. 3. Вторичные остаточные напряжения G_x после разгрузки в зависимости от достигнутого уровня нагрузки