

1547272

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

На правах рукописи

Шубин Александр Николаевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЁТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ КРАНОВЫХ ФЕРМЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Специальность 05.05.05 Подъёмно-транспортные машины

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 1995

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 Ряхин В.А.

доктор технических наук,
профессор Харитонов Н.И.

Ведущее предприятие - ВКТИМонтажстроймеханизация,
г. Москва.

Защита диссертации со- 1985 г. в 14 30
на заседании специализир
"Транспортное машиностр
техническом университете
107005, г. Москва, 2-ая

Ваши отзывы на авт
заверенные печатью, пр

С диссертацией мо
имени Н.Э. Баумана.

Телефон для спра

Автореферат раз

Учёный секрет
специализиров
д.т.н., профе

1547272

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Надежность, производительность и экономичность подъемных кранов во многом зависят от работы несущих металлических конструкций, которые являются наиболее дорогостоящей, трудоёмкой и металлоёмкой составляющей этих изделий.

1548272
Создание металлической конструкции крана должно базироваться на изыскании новых, более совершенных конструктивных форм с учётом специфических особенностей сварки - доминирующего технологического процесса при изготовлении металлических конструкций кранов, а также на совершенствовании методов расчётов, использовании новых материалов и внедрении передовой технологии изготовления. Применяемые в настоящее время методы получения информации о напряжённо-деформированном состоянии конструкции недостаточно полно учитывают факторы, влияющие на несущую способность, поэтому создание уточненной методики позволит более широко использовать имеющиеся в ряде случаев резервы несущей способности отдельных элементов и конструкции в целом, а также обеспечить снижение металлоемкости крановых конструкций за счет более совершенных методов расчёта. Поэтому задача совершенствования методов расчёта, конструирования и изготовления крановых ферменных металлоконструкций является в настоящее время весьма актуальной.

Цель работы является совершенствование метода расчёта напряжённо-деформированного состояния пространственных ферменных металлических конструкций кранов на основе численных и экспериментальных исследований с учётом конструктивно-технологических характеристик сварных узловых соединений элементов решётки.

Методы исследования. При проведении теоретических исследований использованы методы строительной механики, метод конечных элементов, теория нестационарной теплопроводности, теория неизоэтермического пластического течения, итерационные методы и ряд других методов.

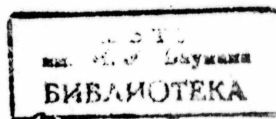
Научная новизна. Разработаны методика и математическое обеспечение численного определения напряжённо-деформирован-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1547272

Шубин А.Н. Разработка метс



вого состояния (НДС) ферменных металлических конструкций кранов с учётом реальной деформативности сварных соединений в узлах. Разработан метод расчётного определения полей остаточных сварочных напряжений и деформаций в узлах пространственных крановых ферменных металлоконструкций, включающий алгоритм изменения временного шага при расчёте полей температур, простой и быстрый алгоритм получения матрицы жесткости восьмиузлового изопараметрического конечного элемента, способ определения расчётных этапов времени при решении задачи нахождения полей напряжений и деформаций в узлах при сварке и остывании. Обоснована и разработана модель деформируемого сварного узла пространственной ферменной крановой металлоконструкции с учётом конструкции узла и имеющихся полей остаточных сварочных напряжений и деформаций. Проведён численный анализ НДС решётчатых металлических конструкций кранов из разных сталей.

Практическая ценность работы. Предложенная методика расчёта позволяет на стадии проектирования определять напряжённо-деформированное состояние ферменных металлоконструкций кранов и помогает выбрать рациональную конструктивную схему изделия путём расчёта различных вариантов с учётом технологии изготовления. Результаты расчёта полей остаточных сварочных напряжений и деформаций могут быть использованы при расчёте несущей способности, в том числе усталости и трещиностойкости элементов по известным методикам.

Применение результатов диссертационной работы позволяет упростить процесс проектирования металлоконструкций. Данную методику целесообразно использовать в составе САПР при проектных и научно-исследовательских работах по разработке решётчатых металлических конструкций новых кранов.

Достоверность полученных результатов и сделанных выводов подтверждена обоснованностью принятых при построении математических моделей допущений, численными экспериментами по оценке точности вычислений, сравнением с результатами тестовых теоретических решений и расчётными данными других авторов, а также путём сопоставления с результатами экспериментальных исследований, проведённых на созданном макете решётчатой металлической конструкции крана.

Реализация результатов работы. Результаты исследований были использованы при проведении расчётов крана КК20, производимого ПО "Подъемник" г.Ташкент, в НИИАП МГТУ им. Н.Э.Баумана при выполнении научно-исследовательских и конструкторских работ и в учебном процессе кафедры "Подъемно-транспортные машины и робототехнические комплексы" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Аппробация работы. Основные положения докладывались и обсуждались на ежегодных научных семинарах кафедры "Подъемно-транспортные машины и робототехнические комплексы" МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1990-1995 годах, на 2-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы развития и совершенствования подъемно-транспортной, складской техники и технологии", г. Москва, октябрь 1990 г., на Всесоюзной научно-технической конференции "Новое в подъемно-транспортном машиностроении", г. Москва, сентябрь 1991 г., на научно-технической конференции стран СНГ "Производство и надёжность сварных конструкций", г. Калининград, январь 1993 г., на научно-технической конференции с международным участием "Проблемы подъемно-транспортной техники", г. Алушта, октябрь 1993 г., на международной научно-технической конференции "Сварка и родственные процессы в строительстве и стройиндустрии", г. Москва, июнь 1994 г. и на научно-технической конференции с международным участием "Новое в подъемно-транспортной технике", г. Москва, октябрь 1994 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть работ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы, приложений. Работа содержит 190 страниц машинописного текста, 3 таблицы, 45 рисунков, 11 страниц приложений. Список литературы включает 124 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, приведена общая характеристика работы.

В первой главе проведён анализ существующих методов расчёта пространственных крановых ферменных металлических конструкций на основе работ Х.А. Винокурского, М.М. Гохберга, Н.Н. Запольского, П.А. Кудрявцева, Н.Н.Панасенко и других. Изучен вопрос расчёта стержней на прочность и устойчивость (В.З. Власов, А.А. Ликовский, А.Р. Ржаницын, А.С. Вольмир и др.). Выявлено, что несущая способность стержня существенно зависит от жесткости узлов, на основании чего был сделан вывод о необходимости определения напряжённо-деформированного состояния сварных узлов ферменных металлических конструкций. Рассмотрена задача расчётного определения сварочных напряжений и деформаций, изучены работы Г.А. Николаева, Н.О.Окерблома, Е.О. Патона, А.В.Вершинского, В.А. Винокурова, В.С. Игнатъевой, С.А. Куркина, В.М. Сагалевича, Ю.Уэда и других. Проведён анализ литературных данных по учёту технологических напряжений при расчёте НДС решётчатых металлоконструкций (В.И.Махненко, М.Р. Нургужин, В.А. Ряхин и др.).

Исходя из проведённого анализа, определены следующие задачи исследования:

1. Разработать методику расчётного определения напряжённо-деформированного состояния сложного пространственного сварного узла при изготовлении и эксплуатации конструкции.
2. Разработать модель деформируемого сварного узла пространственной ферменной крановой металлоконструкции с учётом конструкции узла и имеющихся полей остаточных сварочных напряжений и деформаций.
3. Разработать алгоритм и программы численного исследования напряжённо-деформированного состояния пространственных крановых ферменных металлических конструкций с учётом геометрической нелинейности расчётной схемы, произвольной диаграммы работы материала и имеющихся конструктивно-технологических характеристик сварных узлов.

Вторая глава посвящена расчётному определению напряжённо-деформированного состояния сварных узлов металлических конструкций. Принятый метод определения напряжений и деформаций (в том числе и остаточных сварочных) в сложных узлах крановых металлоконструкций основан на применении метода конечных элементов для получения полей температур,

перемещений, деформаций и напряжений. Основные зависимости метода конечных элементов были использованы при следующих предпосылках и допущениях:

1. Непрерывная величина (температура, перемещение) заменяется дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей.
2. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области, сама область разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами.
3. Свойства материала внутри одного элемента одинаковы и постоянны во время выполнения одного расчётного шага.
4. Диаграмма работы материала может быть произвольной.
5. Напряжения и деформации определяются с применением теории неэвотермического пластического течения для приращений.

Учитывая достаточно общий характер постановки задачи исследования, охватывавший различные типы соединений стержней в узлах, решение проводилось численными методами с использованием ЭВМ.

Определение полей температур проводилось методом конечных элементов путём минимизации следующего функционала

$$\int_V \left((\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) / 2 - (Q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}) T \right) dV + \int_{S_1} q T ds + \int_{S_2} \frac{h}{2} (T - T_{\infty})^2 ds,$$

где V -- объём рассматриваемого тела,

S_1 -- поверхность, на которой задан поток тепла через границу,

S_2 -- поверхность конвективного теплообмена.

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ -- коэффициенты теплопроводности материала по направлению осей x, y, z , [Вт/(м·К)],

T -- температура, [К],

Q -- объёмная мощность источника тепла внутри тела, [Вт/м³],

c -- удельная теплоёмкость материала [Дж/(кг·К)],

ρ -- плотность, [кг/м³],

t -- время, [с].

k -- коэффициент теплообмена с окружающей средой,
[Вт/м²К],

T_{∞} -- температура окружающей среды, [К],

q -- поток тепла через поверхность, [Вт/м²].

Во времени задача решалась конечно-разностным методом с применением центральной разностной схемы. Такой способ приводит к уравнению

$$([K] + \frac{1}{\Delta t} \cdot [C]) \cdot \langle T \rangle_i = \frac{1}{\Delta t} \cdot [C] \cdot \langle T \rangle_{i-1} - \langle F \rangle,$$

где $[K]$ -- глобальная матрица теплопроводности на рассматриваемом этапе времени,

i -- номер рассматриваемого этапа времени,

$[C]$ -- глобальная матрица демпфирования на рассматриваемом этапе времени,

$\langle F \rangle$ -- глобальный вектор тепловой нагрузки на рассматриваемом этапе времени,

Δt -- интервал времени между двумя шагами по времени,

$\langle T \rangle_i$ -- вектор узловых значений температуры на рассматриваемом этапе, неизвестный,

$\langle T \rangle_{i-1}$ -- вектор узловых значений температур предыдущего этапа времени, неизвестный.

Были проведены численные эксперименты по определению рационального шага приращения по времени Δt при вычислении полей температур при сварке и остывании, в результате которых установлено, что наилучшие результаты для рассмотренного круга задач получаются при таких значениях шага Δt , при которых приращение температуры в отдельно взятой точке не превышает 10 К и не меньше 5 К. Поскольку большая разница ведёт к меньшей точности решения в силу принятого конечно-разностного метода, а малый шаг по времени приведёт к необходимости определения температур большее число раз, что влечёт за собой нарастание ошибок округления и увеличение стоимости решения. Эти результаты взяты за основу при разработке алгоритма определения шага по времени.

Чтобы увеличить точность определения температурных полей, производился учёт зависимости тепловых свойств сталей

от температуры.

Определение полей остаточных сварочных напряжений и деформаций требует решения упруго-пластической задачи для рассматриваемого сварного узла. Для решения такой задачи были применены итерационный метод и принципы упругих решений, которые позволили представить задачу теории пластичности в виде последовательно уточняемых задач теории упругости с некоторыми дополнительными условиями. Задача решалась методом начальных напряжений с применением теории неизоотермического пластического течения. Соотношение связи между напряжениями и деформациями формулировалось для приращений этих величин. При этом приращения полных деформаций с применением принципа аддитивности выглядят следующим образом:

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_e\} + \{d\varepsilon_p\} + \{d\varepsilon_t\} + \{d\varepsilon_o\}$$

где $\{d\varepsilon\}$ - вектор приращений полных деформаций;

$\{d\varepsilon_e\}$ - вектор приращений упругих деформаций;

$\{d\varepsilon_p\}$ - вектор приращений пластических деформаций;

$\{d\varepsilon_t\}$ - вектор приращений деформаций, вызванных изменением размеров тела при изменении температуры;

$\{d\varepsilon_o\}$ - вектор приращений деформаций, вызванных структурными превращениями.

Соотношение между напряжениями и деформациями записывается в виде функционала :

$$F(\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, T) = 0$$

где $\{\sigma\}$ - вектор напряжений в точке;

$\{\varepsilon\}$ - вектор деформаций в точке;

T - температура в точке.

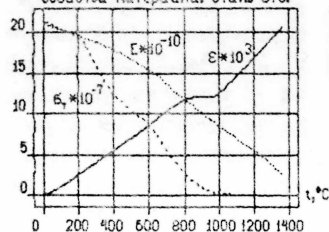
При численном определении полей остаточных сварочных напряжений и деформаций решается ряд упруго-пластических задач с воспроизведением полной картины технологического процесса сварки. Решение осуществляется методом конечных элементов для трёхмерных сварных узлов с определением объёмного напряжённо-деформированного состояния. В качестве основного элемента принят восьмиузловой изопараметрический элемент. Механические характеристики материала принимаются в зависимости от температуры в элементе. Тепловые деформации определяются по принятым дилатограммам, соответствующим усло-

виям остывания и позволяющим одновременно учитывать тепловое расширение и деформации при фазовых превращениях. Точность определения полей остаточных сварочных напряжений и деформаций существенным образом зависит от способа выбора шагов во времени для проведения расчёта напряжённо-деформированного состояния. При выборе этих этапов учитывается время достижения температурой в элементе наибольшего значения, время достижения температурой в элементе величины, при которой происходит перелом в дилатометрической кривой, и время, при котором разница между достигнутыми температурными деформациями и температурными деформациями на предыдущем этапе времени равна деформации наступления пластического состояния для одноосного нагружения при достигнутой температуре. Такой подход позволяет достигнуть быстрой сходимости для упруго-пластической задачи за счёт уменьшения пластических деформаций на одном шаге и обеспечить правильную разгрузку с полным прохождением кривой деформирования.

На основе разработанных алгоритмов были определены остаточные сварочные и эксплуатационные напряжения и деформации для различных конфигураций сварных узлов металлоконструкций, при различных термических циклах сварки, для сталей Ст3, 09Г2С, Х18Н9Т. Расчётным путём установлено влияние последовательности выполнения сварных швов и режимов сварки на возникающее напряжённо-деформированное состояние узла и возможность определения для каждого конкретного сварного узла такой последовательности выполнения соединений, которая ведёт к уменьшению концентрации технологических напряжений. В качестве примера на рис. 1 приведены графики остаточных сварочных напряжений вдоль линий А-А и В-В для пространственного сварного узла фермы из стали Ст3 при следующих режимах сварки: $I = 160$ А, $U = 24$ В, $v = 0,006$ м/с. В околошовных зонах наблюдаются высокие остаточные напряжения и смена знака напряжений. Величины остаточных напряжений тем больше, чем позднее выполняется данный сварной шов.

В связи с перспективой применения подъёмно-транспортных средств для освоения мирового океана был рассмотрен вопрос влияния внешнего гидростатического давления на напряжённо-деформированное состояние сварных узлов металлоконструкций.

Свойства материала. Сталь Ст3.



Режимы сварки:
 $I = 160 \text{ A}$,
 $U = 24 \text{ В}$,
 $V = 5 \text{ мм/с}$.

Схема узла.

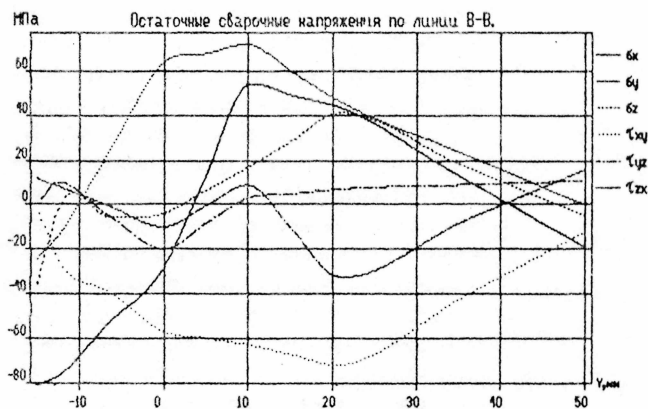
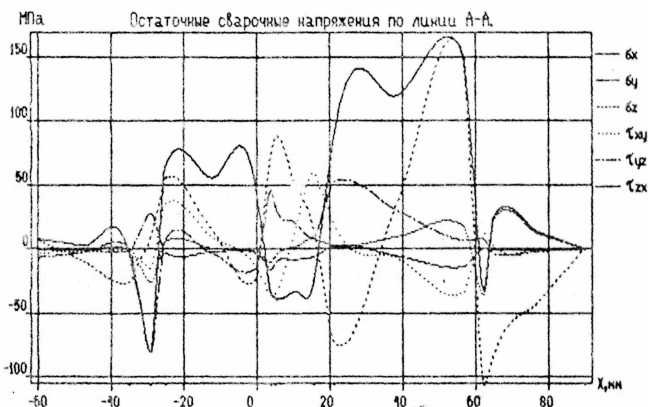
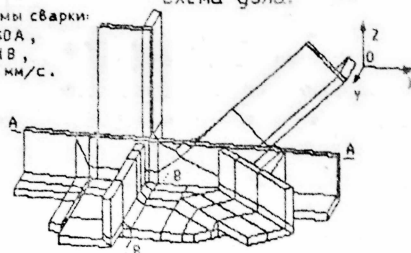


Рис. 1. Сварочные напряжения в узле фермы.

Проведённые расчёты для сварных узлов из стали X18H9T показывают, что внешнее давление обнаруживает своё влияние при совместном действии с рабочей нагрузкой. Происходит сглаживание имеющихся пиков напряжений, напряжения распределяются более равномерно, в результате чего снижается влияние технологических концентраторов. Особенно сильно данный эффект сказывается в зонах сварных швов, что объясняется наиболее высоким уровнем нагрузки этих зон, вызывающим пластическое деформирование.

В третьей главе изложены этапы разработки метода расчёта напряжённо-деформированного состояния пространственных решётчатых металлических конструкций кранов с учётом технологических напряжений. Метод основан на широком использовании метода конечных элементов. Проведён анализ расчётных схем металлоконструкций, учитывающий данное обстоятельство, .. выявлено, что для получения расчётной схемы, наиболее полно отвечающей реальной металлической решётчатой конструкции крана, необходима аппроксимация узлов сопряжения стержней упруго-пластическими деформируемыми суперэлементами.

В качестве основного пространственного элемента для решения задачи определения напряжённо-деформированного состояния решётчатой конструкции выступает стержень с двумя узлами. В каждом из узлов при учёте растяжения, изгиба и кручения присутствует шесть степеней свободы.

Для стандартизации получения матриц жёсткости элементов принято получать их в местной системе координат, связанной со стержнем, а затем осуществлять преобразование координат в глобальную систему. Положение осей y и z местной системы координат в пространстве задаётся с помощью угла поворота местной оси z относительно вертикальной плоскости, проходящей через стержень. Преимущество данного способа в том, что для установления связи между местной и общей системой координат требуется хранение только одного числа, а, например, для наиболее широкого применения способа задания третьей точки - трёх координат этой точки.

Введена матрица жёсткости стержневого элемента с учётом

всех шести слагаемых выражения для потенциальной энергии:

$$P = \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{M_K^2}{GJ_K} + \frac{M_Y^2}{EJ_Y} + \frac{M_Z^2}{EJ_Z} + \frac{N^2}{EA} + \frac{\eta_Y \cdot Q_Y^2}{GA} + \frac{\eta_Z \cdot Q_Z^2}{GA} \right) dt,$$

где M_K - внутренний крутящий момент ;

M_Y, M_Z - внутренние изгибающие моменты, направленные вдоль осей Y и Z ;

N - внутренняя осевая сила ;

Q_Y, Q_Z - внутренние сдвиговые силы ;

E, G - модули упругости первого и второго рода ;

J_K - момент инерции кручения сечения стержня ;

J_Y, J_Z - моменты инерции сечения относительно осей Y и Z ;

A - площадь сечения стержня ;

l - длина стержня ;

η_Y, η_Z - безразмерные коэффициенты, зависящие от формы сечения.

При этом произведён учёт двух последних слагаемых, который существенен в определённых случаях, например, для стержня прямоугольного сечения при равенстве длины стержня и высоты сечения. При этом вклад деформации сдвига в прогиб стержня составляет около половины общего прогиба.

Рассмотрены вопросы учёта стеснённого кручения, а также геометрической и физической нелинейности для стержней при расчёте металлоконструкций.

Определение напряжённо-деформированного состояния пространственной ферменной крановой металлоконструкции с учётом технологических напряжений производится с моделированием сварных узлов с помощью суперэлементов. Суперэлементы повторяют форму и размеры конкретных частей конструкции и объединяют несколько базисных конечных элементов с широким изменением характеристик материала, различными закреплениями, внутренними и внешними силами и т.д.. При разбиении конструкции на элементы и суперэлементы для каждого суперэлемента вектор нагрузки $\langle F \rangle$ подразделяется на нагрузку, приложенную к наружным узлам или суперузлам $\langle F_n \rangle$ и нагрузку, приложенную к внутренним узлам суперэлемента $\langle F_v \rangle$. Точно так же полный вектор перемещений суперэлемента

(б) разделяется на две части, внутреннюю и наружную, а полная матрица жёсткости [K] для суперэлемента подразделяется на четыре части, и уравнение равновесия для суперэлемента представляется в следующей расчленённой форме :

$$\begin{bmatrix} [K_N] & [K_{NB}] \\ [K_{BN}] & [K_B] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \langle \delta_N \rangle \\ \langle \delta_B \rangle \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \langle F_N \rangle \\ \langle F_B \rangle \end{Bmatrix}$$

Для исключения из общего вектора перемещений суперэлемента внутренней части второе блочное уравнение умножается на множитель $[K_{NB}] \cdot [K_B]^{-1}$ и затем из первого уравнения вычитается второе. В результате получаем :

$$([K_N] - [K_{NB}] \cdot [K_B]^{-1} \cdot [K_{BN}]) \cdot \langle \delta_N \rangle = \langle F_N \rangle - [K_{NB}] \cdot [K_B]^{-1} \cdot \langle F_B \rangle .$$

Выражение в скобках представляет собой матрицу жёсткости для суперэлемента относительно наружных узлов, а правая часть данного выражения - вектор внешней нагрузки для суперэлемента. После получения перемещений в суперузлах определяется напряжённо-деформированное состояние для каждого сварного узла при приложении внешней нагрузки к крановой конструкции методом конечных элементов с применением полученных перемещений в качестве граничных условий. Размерность решаемой задачи при этом невелика, что благоприятно сказывается на точности результатов и скорости решения. Вычисление матриц для суперэлементов осуществляется с применением разработанных программ формирования матриц элементов и решения систем уравнений, что аналогично операциям блочного исключения.

Условия сборки и последовательность выполнения соединений влияют на образование полей остаточных сварочных напряжений и деформаций в ферменных металлоконструкциях, и возможны различные варианты построения расчётных схем. Это обусловлено требованиями к точности расчётов. Разработанные алгоритмы и программы позволяют учесть эти факторы.

Проведено сравнение результатов определения напряжённо-деформированного состояния с учётом технологических напряжений и без него для ряда металлических конструкций, в том числе для козлового крана КК20, изготовленного из стали 09Г2С, грузоподъёмностью 20 т, производимого ПО "Подъёмник" г.Ташкент. Наибольшее перемещение при учёте

технологических напряжений больше на 9%, напряжения в стержневых элементах отличаются на 11%. Кроме того, расчёт металлоконструкции с учётом технологических напряжений даёт более полную картину напряжённо-деформированного состояния несущей конструкции крана, поскольку имеется информация о напряжениях в сварных узлах. Таким образом, очевидна необходимость проведения расчёта с учётом технологических напряжений для определения напряжённо-деформированного состояния металлоконструкции.

Четвёртая глава посвящена экспериментальным исследованиям податливости пространственных решётчатых металлоконструкций с учётом технологии изготовления и истории нагружения. Для экспериментальных исследований была изготовлена модель пространственной металлоконструкции консольного исполнения из уголков 25х4 ГОСТ 8509-86 из стали 09Г2С. Узлы фермы были выполнены по распространенной на практике схеме крепления уголков с применением фасонки. Определение механических характеристик стали уголков для всей партии производилось опытным путем по ГОСТ 1497-73 на разрывной машине типа Р-5. Определённые характеристики были использованы в расчёте напряжённо-деформированного состояния экспериментальной фермы по разработанной методике. В задачи экспериментальных исследований поведения пространственных металлоконструкций под нагрузкой входило:

1. Проверка достоверности результатов теоретических исследований.
2. Получение диаграмм прогибов конструкции в двух плоскостях при различных уровнях нагрузок и последующей разгрузки.
3. Оценка влияния повторных нагружений на появление остаточных прогибов конструкции.

Вся числовая информация, полученная при проведении экспериментальных исследований, по специально разработанной программе была обработана на ЭВМ и представлена в параметрах перемещений в двух плоскостях. Эксперимент показал, что после снятия нагрузки образуются остаточные перемещения, а величины остаточных перемещений зависят от уровня нагрузки и повторности приложений нагрузки. Особенностью эксперимента явилось то, что ферма не испытывала рабочих нагрузок до

проведения эксперимента, и напряжения в конструкции были только технологическими, образовавшимися в результате изготовления фермы. Анализ результатов экспериментального исследования консольной фермы свидетельствует о её сложной пространственной работе. Сравнение экспериментальных и теоретических кривых перемещений фермы под нагрузкой подтверждает адекватность математической модели решётчатой металлоконструкции с допустимой погрешностью (не более 5%). Экспериментальные данные отличаются от результатов теоретического исследования в среднем на 3%.

В приложении к диссертации даны программы расчёта на ЭВМ решетчатых металлических конструкций кранов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выявлено, что применяемые для крановых пространственных ферменных конструкций расчётные схемы не всегда адекватно отражают деформирование реальной несущей металлической конструкции вследствие недостаточного учёта влияния полей остаточных сварочных напряжений и деформаций на напряжённо-деформированное состояние (НДС) конструкции. Обоснована необходимость проведения расчётов НДС пространственных ферменных металлических конструкций кранов с учётом физической нелинейности, обусловленной текучестью зон сварных соединений.
2. Разработан метод определения остаточных сварочных напряжений и деформаций в пространственных сварных узлах крановых ферменных металлоконструкций, включающий алгоритм изменения временного шага при расчёте полей температур, алгоритм получения матрицы жёсткости восьмиузлового изопараметрического конечного элемента, способ определения расчётных этапов времени при решении задачи расчёта полей напряжений и деформаций в узлах при сварке и остывании.
3. Предложен метод численного определения НДС крановых пространственных ферменных металлоконструкций с учётом технологических напряжений на основе модели деформируемого сварного узла.
4. На основе проведения расчётного определения объёмного НДС

сварных пространственных узлов ферменных крановых конструкций при сварке и последующем нагружении для сталей Ст3, 09Г2С и Х18Н9Т выявлена картина взаимодействия остаточных сварочных напряжений с напряжениями от нагрузки. Расчётным путём установлена возможность определения рациональной последовательности выполнения сварных швов, ведущей к уменьшению остаточных сварочных напряжений в отдельных зонах угловых соединений узлов в 1,3...1,8 раза. Результаты расчётов перемещений пространственных ферменных конструкций под нагрузкой с учётом остаточных сварочных напряжений в узлах согласуются в целом с результатами проведённых экспериментов. 5. Эффективность разработанных алгоритмов и программ подтверждена использованием их при проектных работах на ПО "Подъёмник" и НИИАПП МГТУ.

Материалы диссертаций отражены в следующих печатных работах:

1. Вершинский А.В., Ходжаев У.Т., Шубин А.Н. Программный комплекс для определения напряжённо-деформированного состояния сложных сварных узлов крановых металлических конструкций // Тезисы 2-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы развития и совершенствования подъёмно-транспортной, складской техники и технологии". -М., 1990. -с. 67.

2. Вершинский А.В., Шубин А.Н., Ходжаев У.Т. Определение напряжённо-деформированного состояния сложных сварных узлов ферменных металлических конструкций кранов мостового типа. // Тезисы всесоюзной научно-технической конференции "Новое в подъёмно-транспортном машиностроении". -М., 1991. -с.26.

3. Вершинский А.В., Ходжаев У.Т., Шубин А.Н. Несущая способность сварных металлических конструкций // Тезисы докладов научно-технической конференции стран СНГ "Производство и надёжность сварных конструкций". -М., 1993. -с.31.

4. Вершинский А.В., Ходжаев У.Т., Шубин А.Н. Исследование несущей способности металлических конструкций кранов мостового типа с учётом физической и геометрической нелинейности // Печатные материалы научно-технической конференции с международным участием "Проблемы подъёмно-транспортной техники". -Алушта, 1993. -с.33-35.

5. Шубин А.Н. Метод расчёта несущей способности сварных узлов крановых металлоконструкций. // Сварка и родственные технологии в строительстве и стройиндустрии: Материалы международной научно-технической конференции. -М., 1994. -с.65-67.

6. Вершинский А.В., Шубин А.Н., Полухин А.В. Методы расчёта напряжённо-деформированного состояния крановых ферменных металлоконструкций с учётом технологических напряжений // Печатные материалы научно-технической конференции с международным участием "Новое в подъёмно-транспортной технике". -М., 1994. -с.37.

Подписано к печати . 1995 Объем 1,0 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ . . . Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана