

1562691

На правах рукописи

НУРГУЖИН МАРАТ РАХМАЛИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ
РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ЖИВУЧЕСТИ КРАНОВЫХ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ**

Специальности: 05.05.05 – Подъемно-транспортные машины
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 1999

Работа выполнена в Карагандинском государственном техническом университете

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Ряхин В.А
- доктор технических наук, профессор Данилов
- доктор технических наук, профессор Киселев

Ведущая организация:

АООТ "Карачаровский механический завод"

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1562691

Нургузин М.Р. Разработка

Защита состоится "05" июля 1999 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д053.15.06 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Российская Федерация, Москва 2-ая Бауманская ул., д. 5.

и в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

1999 г.

1562691

Ромашко А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность проблемы. Грузоподъемные краны, от технического состояния которых зависит не только нормальное функционирование технологических процессов, но и безопасность труда работающих, относятся к классу машин с высокой интенсивностью использования. Реальное состояние на сегодня таково, что более 75% грузоподъемных машин (ГПМ), в том числе и в Республике Казахстан, отработали нормативный срок службы, а отсутствие в достаточной мере финансирования по реконструкции дефектных узлов, низкий уровень управления вопросами безопасности в отраслях промышленности, снижение инвестиций и пр., обуславливают низкий уровень безопасности и надежности технологических машин.

Учитывая то обстоятельство, что большая часть металла (60-80%), необходимая для выпуска данного класса машин, используется на производство металлоконструкций, можно констатировать, что создание совершенных по металлоемкости, экономичных в изготовлении и надежных в эксплуатации сварных металлических конструкций является одной из важнейших задач в области подъемно-транспортного машиностроения (ПТМ). Важную роль при этом играет сварка, являющаяся доминирующим технологическим процессом в области производства металлоконструкций ПТМ. Вместе с тем, использование сварочных технологий при производстве конструкций имеет ряд особенностей, без учета которых не могут быть получены надежные и экономичные сварные конструкции. Это характерная форма сварных соединений, вызывающая концентрацию напряжений и деформаций, влияние термического цикла сварки на свойства основного металла, высокие сварочные остаточные напряжения, значительные пластические деформации, возможность образования при сварке дефектов.

Опыт эксплуатации сварных крановых металлоконструкций показывает наличие большого числа усталостных и хрупких разрушений. Очагами разрушений сварных соединений, как правило, являются дефекты сварки, конструктивные несплошности, конструктивно-технологическая концентрация напряжений и деформаций. В свете требований обеспечения надежности изделий и рационального использования металла особую актуальность приобретает создание совершенных методов анализа сварных металлоконструкций. Осознание того, что во всех реальных сварных конструкциях с самого начала существуют трещиноподобные дефекты, требует разработки новых методов, позволяющих исследовать распространение трещин в условиях как монотонных, так и циклических нагружений с учетом влияния остаточных напряжений и деформаций. Ныне действующие инженерные методики не учитывают в полной мере указанные факторы.

Обзор существующих методов расчета показывает, что наиболее серьезное

1
М Г Т У
им. Н. Э. Баумана
Б.И.Д. 10734А

признание получила концепция "соответствие назначению" ("fitness for purpose"), в рамках которой предложены процедуры автоматизированного анализа (CAE – computer aided engineering), основанные на сочетании соответствующих стандартных испытаний материалов и численных расчетов с привлечением современных подходов механики деформирования и разрушения. Вместе с тем адекватность подобных подходов существенно зависит от учета реальных нагрузок, действующих на металлоконструкцию при эксплуатации грузоподъемных машин.

Дальнейшее совершенствование методов автоматизированного анализа и прогнозирования живучести сварных конструкций в рамках концепции "соответствие назначению" требует комплексного учета целого ряда факторов, способных существенно повлиять на результаты расчета, по своей сути реализации системного подхода: оценки реальной нагруженности сварных соединений с учетом многоосности напряженно-деформированного состояния, конструктивно-технологической концентрации напряжений в сварных соединениях с трещиноподобными дефектами, остаточных сварочных напряжений и деформаций, применение адекватных критериев прочности и пр.

В этой связи, разработку новых методов расчета сварных крановых металлоконструкций, базирующихся на системном анализе и учитывающих вышеперечисленные особенности технологии изготовления и эксплуатации на основе моделирования машин и систем машин, их реализацию методами нелинейной механики деформирования и разрушения следует рассматривать как актуальную проблему обеспечения надежности грузоподъемных машин, имеющую важное значение для экономики Республики Казахстан (РК).

Цель работы. Решение научной проблемы оценки и обеспечения живучести грузоподъемных машин путем разработки методологических основ автоматизированного анализа и прогнозирования трещиностойкости сварных соединений и узлов крановых металлоконструкций с учетом системных факторов, их конструктивно – технологического исполнения и сварочных напряжений и деформаций.

Идея работы заключается в применении системного подхода к созданию методов анализа, охватывающих жизненный цикл сварной крановой металлоконструкции, и прогнозирования характеристик живучести на основе механики разрушения и имитационного моделирования.

Задачи исследования. Поставленная цель потребовала решения следующих основных задач:

1. Проведение научно-обоснованного анализа разрушений, их классификация и выявление основных факторов, влияющих на несущую способность сварных крановых металлоконструкций.
2. Разработка методов и алгоритмов имитационного моделирования систем типа "грузоподъемная машина - совокупность технологий" для оценки систем-

ных факторов на метауровне и систем с распределенными параметрами на макроуровне.

3. Разработка методов автоматизированного анализа сварных соединений с трещиноподобными дефектами на микроуровне в процессе сварки и внешнего силового нагружения.

4. Исследование закономерностей образования остаточных напряжений и деформаций в элементах сварных крановых металлоконструкций, автоматизированный анализ и получение регрессионных зависимостей для параметров прочности сварных соединений с трещиноподобными дефектами.

5. Разработка и обоснование конструктивно - технологических мероприятий по повышению прочности сварных соединений крановых металлоконструкций.

6. Разработка математических моделей прогнозирования характеристик живучести сварных соединений и узлов крановых металлоконструкций с дефектами типа трещин.

7. Создание алгоритмического и программного обеспечения системы автоматизированного анализа и прогнозирования характеристик живучести сварных крановых металлоконструкций.

Научная новизна. В результате теоретических и экспериментальных исследований обобщены научные подходы по оценке и прогнозированию характеристик живучести крановых металлоконструкций. На основе системного анализа разработаны математические модели сварных соединений с трещиноподобными дефектами, комплексно учитывающие характер нагруженности, геометрию объекта и нерелаксированные остаточные сварочные напряжения и деформации. Их отличия по сравнению с существующими подходами заключаются в:

- развитии системного подхода к исследованию несущей способности сварных крановых металлоконструкций с трещиноподобными дефектами;

- разработке модели системы типа "грузоподъемная машина - совокупность технологий" для учета нагруженности сварной крановой металлоконструкции, обеспечивающей адекватное отображение процессов обслуживания и определения режима работы крана;

- развитии численных методов определения остаточных сварочных напряжений и деформаций, в том числе и объемных, основанных на численном интегрировании уравнения связи неизоэнтальпийской теории течения между напряжениями и деформациями в форме приращений совместно с коррекцией напряжений методом радиального возврата и α - ускорением сходимости итерационного процесса;

- развитии численных методов расчета критериальных параметров механики разрушения на основе энергетических подходов;

- создании расчетных формул для критериальных параметров механики

разрушения и коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в типовых сварных соединениях крановых металлоконструкций в зависимости от их геометрии, длины трещины, внешнего нагружения и механических свойств материала;

- создании математических моделей статической и циклической трещиностойкости сварных соединений с конструктивными несплошностями с учетом влияния остаточных напряжений.

Осуществлен комплексный анализ поведения сварных соединений с трещиноподобными дефектами в процессе сварки и внешнего силового нагружения, в результате чего:

- впервые установлено, что в зонах концов коротких швов и в местах их пересечения возникновение объемных напряжений растяжения связано с величиной удельной погонной энергии сварки q_{II}/δ ; при $q_{II}/\delta < 12500 \text{ Дж/см}^2$ величина σ_z достигает $(0,3 \dots 0,5)\sigma_T$;

- получена зависимость для коэффициента интенсивности остаточных напряжений в сварных соединениях, выполненных короткими швами, для поперечных и продольных сквозных трещин в зависимости от геометрии соединения, размеров трещин, уровня нерелаксированных остаточных напряжений и режима сварки;

- впервые получена универсальная формула (в табулированном виде) для определения энергетического J-интеграла в типовых образцах, моделирующих стыковые сварные соединения с трещиноподобными дефектами, в зависимости от геометрии изделия, размеров дефектов, механических свойств материала и уровня приложенных и остаточных напряжений;

- установлено, что степень влияния остаточных напряжений на статическую и циклическую трещиностойкость существенно зависит от уровня приложенной нагрузки, предела текучести материала и коэффициента асимметрии внешнего нагружения; при уровне внешних нагрузок, соответствующих $\sigma_p < 0,8\sigma_T$ и $R < 0,7$ учет влияния остаточных напряжений обязателен.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируется на накопленном опыте теоретических и расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния соединений и узлов крановых металлоконструкций, на применении апробированных методов математической статистики и имитационного моделирования, неізотермической теории течения и механики разрушения, методов конечных и граничных элементов, а также применении соответствующего программного обеспечения.

Адекватность разработанных моделей проверена путем сопоставления с экспериментальными данными, полученными как автором, так и другими исследователями.

Практическая ценность. Разработанные основные положения системного

анализа сварных крановых металлоконструкций представляют методологическую основу и реализуют решение проблемы обеспечения живучести грузоподъемных машин (ГПМ) при соблюдении требований безопасности, а также стимулируют дальнейшие исследования несущей способности изделий с трещиноподобными дефектами.

Практическая ценность работы заключается в разработке:

- алгоритмов и программных комплексов для определения остаточных сварочных напряжений и деформаций, в том числе и объемных, их релаксации в процессе внешнего силового нагружения;
- многоцелевого моделирующего интерфейса для создания моделей систем "машина - совокупность технологий" на основе языка имитационного моделирования GPSS/PC для оценки режима работы ГПМ;
- алгоритмов и программных комплексов численного и аналитического определения критериальных характеристик линейной и нелинейной механики разрушения;
- алгоритмов, программного комплекса и банка данных по определению критериальных характеристик механики разрушения и построения диаграмм усталостного разрушения металлов на основе стандартных испытаний на выносливость бездефектных материалов;
- конструктивно-технологических мероприятий по повышению несущей способности сварных соединений с трещиноподобными дефектами;
- методики инженерного расчета характеристик живучести крановых металлоконструкций при обеспечении требований безопасности.

Созданная в работе компьютерная система автоматизированного анализа и прогнозирования характеристик живучести позволяет решать в комплексе задачи оценки несущей способности сварных крановых металлоконструкций с трещиноподобными дефектами и открывает возможность обосновать сверхнормативную эксплуатацию кранов, имеющих запас живучести.

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, внедрены в ПО "Подъемник" (г. Ташкент), ПО "Карагандагормаш" (г. Караганда).

Методика автоматизированного анализа сварных металлоконструкций внедрена в ПО "Карагандагормаш" (г. Караганда).

Подсистемы компьютерной системы автоматизированного анализа и прогнозирования характеристик живучести сварных крановых металлоконструкций приняты к использованию на предприятиях Ассоциации сварщиков Казахстана (г. Караганда), а также на предприятиях поднадзорных Госгортехнадзору Агентства по ЧС РК.

Результаты диссертационной работы нашли широкое применение в учеб-

ном процессе при подготовке инженеров-системотехников и инженеров-механиков в Карагандинском государственном техническом университете.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научно-технических семинарах КарГТУ (1987-1998 гг.) и кафедры РК-4 МВТУ им. Н.Э. Баумана (1983-1999 гг.), на Международных научных конференциях: "Сварные конструкции" (Киев, 1990, 1995 гг.), 8-ой конгресс по механике разрушения - ICF-8 "Fracture mechanics: Success and Problems" (Киев, 1993), 2-ой конгресс "Защита-95" (Москва, 1995); конференциях ANSYS "Компьютерное проектирование в 21 век" (Питсбург, США, 1996, 1998 гг.), конгрессе NAFEMS "Проектирование, моделирование и оптимизация" (Штуттгарт, Германия, 1997 г.), на Международном семинаре "Применение математических методов в свариваемости" (Австрия, 1997г.), конференции "Сварка и родственные технологии - в XXI век" (Киев, 1998); на всесоюзных научных конференциях и конференциях стран СНГ: "Новое в ПТМ" (1985, 1991 гг.), 2-ой конференции "Проблемы развития и совершенствования подъемно-транспортной и складской техники и технологии" (Москва, 1990), "Производство и надежность сварных конструкций" (Москва, 1993 г.), "Прогрессивные техника и технология машиностроения и сварочного производства" (Киев, 1998 г.).

Публикация. По результатам выполненных исследований изданы три монографии, три учебных пособия, опубликовано 55 печатных работ, получено 6 авторских свидетельств, написано 20 научно – исследовательских отчетов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, изложенных на 421 страницах машинописного текста, включает 128 рисунков и 32 таблицы, библиографию из 334 наименований и Приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, формулируется цель исследования, приведена общая характеристика работы.

В первой главе представлен краткий обзор исследований по разработке методов анализа сварных металлоконструкций, в том числе и крановых, с дефектами типа трещин, поставлены задачи исследования.

Анализ разрушений крановых металлоконструкций, условий их производства и эксплуатации на основе обследования более 350 грузоподъемных машин позволил установить основные факторы, влияющие на несущую способность конструкций машин этого класса. Учет влияния этих факторов и создание системных методов расчета на основе концепции "соответствие назначению" с применением компьютерных технологий требует дальнейшего развития методологических основ расчета и прогнозирования живучести сварных крановых

металлоконструкций. В основу решения данной проблемы может быть положен богатейший опыт отечественных и зарубежных исследований, проектирования и создания сварных конструкций.

Отмечено, что создание системных методов анализа сварных крановых металлоконструкций должно базироваться на блочно-иерархическом подходе, схеме преобразования моделей в процессе создания средств автоматизированного анализа изделия, типовых математических схемах и численных методах расчета, в основе которых лежат исследования В.И. Бусленко, И.П. Норенкова, Б.Я. Советова, Р. Шеннона, Т.Дж. Шрайбера, А.В. Александрова, Н.Н. Малинина, А.М. Масленникова, Г.П. Никишкова, В.А. Постнова, Л.А. Розина, В.А. Светлицкого, Н.Н. Шапошникова, Р. Галлагера, О. Зенкевича, Л. Сегерлинда, П. Бенерджи и др.

Анализ особенностей, привносимых сборочно-сварочными технологиями в процессе производства конструкций, без учета которых не могут быть получены надежные и экономичные изделия, во главу угла ставит проблему определения, релаксации и регулирования, а также учета влияния на прочность остаточных сварочных напряжений и деформаций, в решение которой существенный вклад внесли Г.А. Николаев, Б.Е. Патон, Н.О. Окерблом, И.П. Байкова, А.В. Вершинский, В.А. Винокуров, К.Т. Гатовский, А.Г. Григорьянц, В.С. Игнатьева, В.А. Кархин, С.А. Кузьминов, С.А. Куркин, С.Н. Киселев, Л.М. Лобанов, Э.Л. Макаров, В.И. Махненко, Н.Н. Прохоров, В.М. Сагалевич, О.И. Стеклов, Г.Б. Талыпов, И.П. Трочук, В.И. Труфяков, В. Андерс, Н. Боултон, М. Ватанабе, Р. Гуннерт, К.Масабуча, Д.Розенталь, Д. Радай, К. Сато, Л.Талл, Ю. Уэда и другие.

Осознание того, что трещиноподобные дефекты существуют в изделии изначально, требует создания методов анализа, позволяющих исследовать распространение трещин в условиях как монотонных, так и циклических нагрузжений на основе механики разрушения, в становление которой внесли большой вклад Г.И. Баренблат, В.В. Болотин, Р.К. Вафин, В.С. Иванова, Г.П. Карзов, Л.М. Качанов, А.Я. Красовский, Н.А. Махутов, Е.М. Морозов, В.В. Панасюк, В.З. Партон, Г.С. Писаренко, Г.П. Черепанов, А. Атлури, А. Грифитс, Д. Ирвин, Х. Кихара, Г. Либовиц, У. Мюнзе, Е. Орован, П. Парис, Дж. Райс, М.Сакато, М. Сиратори, А. Уэллс, Дж. Холл, К. Хеллан, Ф. Эрдоган и другие.

Применительно к крановым металлоконструкциям системные методы анализа развиты в работах А.В. Вершинского, В.И. Брауде, А.А. Зарецкого, М.М. Гохберга, С.А. Казака, А.А. Короткого, Ю.Г. Матвиенко, В.М. Соловьева, С.А. Соколова, Д.Н. Спицыной, В.А. Ряхина, Б.А. Пустового и др.

Отмечено, что в настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал распределения остаточных напряжений и деформаций при различных условиях сварки, разработаны как достаточно строгие, так и приближенные методы их расчета. Однако экспериментальные материалы не позво-

ляют с достаточной надежностью оценивать объемное напряженное состояние, для аналитических методов при сложных краевых условиях эта задача не решима. Перспективным в этом отношении являются численные методы, среди которых ведущая роль отводится методу конечных элементов.

Показано, что в процессе анализа сварных соединений с трещиноподобными дефектами основными параметрами прочности следует принимать коэффициент интенсивности напряжений (КИН), энергетический J -интеграл и раскрытие трещины при статическом нагружении и размахи КИН и J - интеграла при циклическом нагружении. Влияние двухчастотного и случайного нагружения учитывается введением эквивалентного КИН и среднего квадратического отклонения КИН. Прогнозирование живучести наиболее целесообразно осуществлять на основе уравнения Пэриса.

Установлено, что для прогнозирования характеристик живучести изделий с трещинами целесообразно привлекать как детерминированный, так и вероятностный подход с целью более корректного обоснования надежности получаемых результатов. В этом случае используются детерминированные модели, являющиеся функциями ряда случайных и неслучайных аргументов. Однако при анализе остаточного ресурса грузоподъемных машин статистические данные по параметрам моделей и возможным сценариям аварий не всегда доступны. Поэтому в основу определения возможности сверхнормативной эксплуатации крановых металлоконструкций, поврежденных трещинами, положен детерминированный подход.

Зависимость нагруженности сварных конструкций от режима работы крана, сочетания расчетных случаев и расчетных нагрузок, их пространственная многомерность, наличие большого количества сварных швов и начальных дефектов требует дальнейшего развития методов автоматизированного анализа элементов и узлов с применением критериев прочности механики разрушения, реализованных в виде компьютерных систем.

Во второй главе сформулированы основные положения системного анализа сварных крановых металлоконструкций и приведена теория и алгоритмы моделирования объектов анализа на мета- и макроуровнях.

Автоматизированный анализ сварных крановых металлоконструкций на основе блочно-иерархического подхода предполагает использование функциональных математических моделей на мета-, макро- и микроуровнях, различающихся степенью детализации рассмотрения процессов в объекте (рис.1).

Предлагаемый в диссертационной работе подход базируется на следующих положениях.

1. Определение режима эксплуатации изделия основано на моделировании систем типа "машина - совокупность технологий". В результате оцениваются коэффициенты загрузки машины и ее элементов, количество циклов и типов нагружения, длительность циклов нагружения и т.п. Использование для фор-

мализации системы типовой Q-схемы и языка имитационного моделирования GPSS позволяет эффективно решать данную проблему.

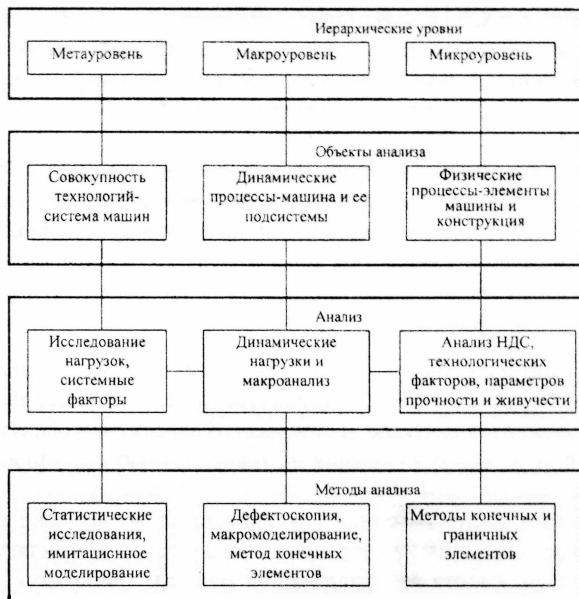


Рис. 1. Иерархические уровни и методы исследования

2. Определение ожидаемых нагрузок на сварные соединения осуществляется на основе макроанализа крановой металлоконструкции, представленной как система с дискретно-распределенными параметрами.

3. Учет технологических факторов реализуется на основе описаний реальной геометрии сварного соединения (с непроплавлениями, конструктивными щелями и пр.) и определения остаточных сварочных напряжений и деформаций.

4. Конструкционное соответствие реального изделия и его модели реализуется на основе применения численных методов анализа.

5. Предельное состояние изделия в момент исчерпания несущей способности при действии статических нагрузок оценивается на основе двухпараметрических критериев в терминах КИН для хрупких и квазихрупких разрушений и J-интеграла для вязких состояний материалов.

Остаточный ресурс в условиях действия переменных нагрузок вычисляется на основе модифицированного уравнения Элбера

$$\frac{dl}{dN} = C_{-1} e^{\lambda(R+1)} (\Delta K)^{m-1} \cdot \varphi(K'_1, R), \text{ при } K'_1{}^{\max} + K'_1 \geq 0. \quad (1)$$

Здесь C_{-1} , m_{-1} , λ - экспериментальные характеристики материала по данным

В.И. Труфякова; dl/dN - скорость роста усталостной трещины; ΔK - размах коэффициента интенсивности напряжений; R - коэффициент асимметрии цикла нагружения; $S = K''/K'$; $\varphi = \exp[\lambda(1-R)/(1+S)]$; K'' и K' - коэффициенты интенсивности максимальных и остаточных напряжений, соответственно.

Интегрирование (1) по l в пределах от начальной длины трещины l_0 до критического значения l_c позволяет определить живучесть изделия - число циклов до разрушения.

При построении имитационной модели системы "грузоподъемная машина-совокупность технологий" используется типовая Q-схема, реализующая особенности непрерывно-стохастического процесса обслуживания, которая однозначно задается в виде:

$$Q = \langle W, U, H, Y, Z, R, A \rangle. \quad (2)$$

Здесь W и U - потоки событий; H - множество внутренних параметров системы; Y - выходной поток событий, Z - множество состояний системы; R - оператор сопряжения элементов системы; A - множество алгоритмов обслуживания.

Считается, что события (задания на транспортную операцию) можно классифицировать следующим образом: чисто случайные события; события с известным законом распределения; фиксированные во времени события. Собранные данные о заданиях на транспортировку груза оформляются на бланке описания модели. Работа грузоподъемной машины (либо двух) моделируется на основе накопителя H и канала обслуживания K с учетом длительности транспортной операции. Интерпретация результатов моделирования осуществляется на основе анализа статистической информации по проведенному моделированию и позволяет оценить загрузку грузоподъемной машины, пропускную способность системы в целом, определить необходимое число машин для реализации транспортных технологий, определить режим работы.

На макроуровне металлоконструкция крана представляется в виде дискретно-распределенной системы. Математической моделью объекта в этом случае является матричное дифференциальное уравнение

$$[K]\{\delta\} + [C]\frac{\partial}{\partial t}\{\delta\} + [M]\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{\delta\} + \{\bar{F}\} = 0, \quad (3)$$

где $[K]$ и $\{\bar{F}\}$ - матрица жесткости и вектор сил системы конечных элементов; $[M]$ и $[C]$ - матрица масс системы и матрица демпфирования; $\{\delta\}$ - вектор узловых перемещений системы конечных элементов.

Решение уравнения (3) методом конечных элементов позволяет определить перемещения и напряжения узлов конечноэлементной модели в функции времени. Особенностью используемого подхода является применение рекуррентных соотношений метода Ньюмарка в процессе решения уравнения (3).

На основе вариационного подхода получены основные матричные уравнения МКЭ в задачах неизоотермической теории упругости и сформулированы основные этапы моделирования систем с распределенными параметрами в условиях статического нагружения.

В соответствии с последовательностью процедур автоматизированного анализа реализована методология технической диагностики сварных металлоконструкций грузоподъемных машин и разработано автоматизированное рабочее место "КРАН", позволяющее осуществлять накопление данных по техническому состоянию, ремонту и реконструкции изделия.

На конкретном примере показана интерпретация результатов моделирования функционирования мостового крана в литейном производстве. Определен режим работы и получены характерные расчетные схемы при моделировании динамических нагрузок на металлоконструкцию мостового двухбалочного крана пролетом 16,5 м и грузоподъемностью $Q=12,5$ т. В результате установлено, что существенное влияние на точность определения динамических нагрузок, действующих на металлоконструкцию и элементы механизма подъема крана, оказывает принятая расчетная модель и время доотрывной стадии подъема груза с жесткого основания.

В третьей главе рассмотрены теоретические положения, методы и алгоритмы автоматизированного анализа систем с распределенными параметрами - сварных крановых металлоконструкций на основе методов конечных и граничных элементов (МКЭ и МГЭ). В основу принятого подхода было положено следующее:

1. Расчет напряжений и деформаций проводился на основе неизоотермической теории течения, так как эта теория наиболее полно описывает процесс деформирования тел при сложном нагружении.
2. Принималась модель степенного и билинейного упрочнения тела, удовлетворяющего критерию текучести Мизеса.
3. Использовался МКЭ, как численный метод интегрирования дифференциальных уравнений неизоотермической теории течения и нестационарной теплопроводности.

При определении остаточных напряжений и деформаций рассматривается упругопластическое деформирование тела, дискретизированного на объемные 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 анализа распределения температуры в конечных элементах, расположенных в зоне термического влияния.

Для сварных соединений простой геометрии и режимов сварки, удовлетворяющих условиям мощного быстродействующего источника тепла, распределение температур принимается по уравнениям тепловых процессов (Н.Н. Рыка-

лин) с учетом ограниченности поперечного сечения. Температура конечного элемента полагается равной температуре его центра тяжести.

Универсальным подходом для анализа тепловых процессов в сварке является метод конечных элементов. Математической моделью в этом случае является нестационарное уравнение теплопроводности с заданными краевыми условиями

$$K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q = \lambda \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4)$$

где K_x и K_y - коэффициенты теплопроводности;

Q - удельная мощность сосредоточенного движущегося источника тепла;

λ - удельная объемная теплоемкость.

Для решения уравнения (4) используется МКЭ в сочетании с разностной схемой Кранка - Николсона. В модели приняты следующие допущения: 1) все теплофизические свойства материала, за исключением плотности, рассматриваются как функции температуры; 2) температурное поле оказывает незначительное влияние на форму элементов; 3) изменение фазы происходит при фиксированной температуре и учитывается скрытая теплота плавления. Принятый подход апробирован при решении тестовых задач.

Основные уравнения для МКЭ в термомеханической задаче имеют вид

$$[K]\{\delta\} = \{P\} + \{H\}, \quad (5)$$

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV. \quad (6)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $\{\delta\}$ - вектор перемещений; $[K]$ - матрица жесткости; $\{P\}$ и $\{H\}$ - силовая и фиктивная термическая нагрузки; $[B]$ - матрица градиентов; $[D]$ - матрица между напряжениями и деформациями в физическом законе среды; V - объем элемента.

Применительно к неизотермической теории течения используется уравнение связи между напряжениями и деформациями в форме приращений

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon_T\} + \frac{dE}{E}\{\sigma\} - \left(\frac{dE}{E} - \frac{d\sigma_T}{\sigma_T} \right)\{S\}, \quad (7)$$

где $\{\sigma\}$ - вектор напряжений;

$\{S\}$ - девиатор вектора напряжений;

$\{d\varepsilon_T\}$ - вектор приращений свободных температурных деформаций;

$\{d\varepsilon\}$ - вектор приращений деформаций.

На основе использования основных соотношений МКЭ и уравнения связи (7) получено условие равновесия упругопластического тела при сварке

$$\{\psi\} = \int_V [B]^T \{\sigma\} dV = 0. \quad (8)$$

Принято шаговое нагружение, внутри шага для нахождения приращения перемещений применяется итерационная процедура метода Ньютона – Рафсона

$$\begin{aligned} \{\Delta\delta\}_i &= [K_e]^{-1} \{\psi\}_{i-1}, \\ \{\delta\}_i &= \{\delta\}_{i-1} + \{\Delta\delta\}_i, \\ \{\varepsilon\}_i &= \{\varepsilon\}_{i-1} + \{\Delta\varepsilon\}_i, \\ \{\sigma\}_i &= \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta\sigma\}_i, \\ \{\psi\}_i &= \{P\} - \int_V [B]^T \{\sigma\}_i dV. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь, i - номер итерации. Матрица жесткости $[K_e]$ может оставаться постоянной или изменяться в зависимости от достигнутого уровня напряжений. В качестве нагрузки используется невязка условия равновесия $\{\psi\}$. Итерационный процесс заканчивается, когда выполнен критерий сходимости. Для ускорения сходимости используется метод α - ускорения при постоянной матрице жесткости, особенностью которого является то, что невязка вычисляется только для пластически деформированных элементов.

Использование зависимостей типа (7) предполагает наличие какой - либо процедуры перехода элементов из упругого состояния в пластическое, то есть определение коэффициента r , который показывает какая часть приращения деформации является упругой. Для определения r предложена точная расчетная процедура без использования традиционных итерационных схем. Для вычисления вектора напряжений элемента используется численное интегрирование (7) совместно с коррекцией напряжений методом радиального возврата в конце каждого k -го шага

$$\{\sigma\}_i^k = \{\sigma\}_i^k \sigma_r / (\sigma_r + f), \quad (10)$$

где $\{\sigma\}_i^k$ - вектор напряжений в конце k -го шага интегрирования;

f - функция текучести в конце k -го шага интегрирования.

Для анализа пространственных сварных соединений предложен приближенный подход, позволяющий учесть многомерность изделия в сочетании с плоским напряженным состоянием в его элементах.

На основе расчетных экспериментов было принято правило имитации образования сварного соединения, которое осуществляется наложением дополнительных граничных условий $\Delta U_i = \Delta U_j$, где ΔU_i и ΔU_j - приращения продольных перемещений узловых точек, принадлежащих граничным конечным элементам. Учет таких граничных условий реализуется на основе использования матрицы индексов.

Показано, что при решении линейных задач анализа концентрации напряжений наиболее эффективным является применение метода граничных элементов в варианте метода фиктивных нагрузок, существенным преимуществом которого является то, что рассматривается только контур сварного соединения. Это позволяет уменьшить размерность задачи на единицу.

Применение указанных новых подходов, внесенных в анализ термосилового нагружения сварных соединений, позволяет существенно повысить эффективность расчетных исследований. На основе вышеизложенного созданы подсистемы анализа КЭЛАПС и ГРАЭЛ системы автоматизированного анализа и прогнозирования живучести сварных крановых металлоконструкций ANWELD.

В четвертой главе исследуется трехмерное напряженно-деформированное состояние узлов крановых металлоконструкций после термосилового нагружения, 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.

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 ($\varepsilon_x = 0$). Варьировались как толщина, так и режимы сварки. В результате было установлено, что появление объемных остаточных напряжений растяжения связано с отношением ширины зоны b_n нагреваемой до температуры T_y к толщине пластины t . Для пластин из сталей Ст3 и 09Г2 предельная ширина составляет 1,2...1,5. 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 КЭЛАПС 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 $q_n/\delta < 12500$ Дж/см²) возникают объемные напряжения растяжения значительной величины (рис.2), что способствует появлению разрушений в этих зонах при пониженной пластичности металла. 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. Расчетное и экспе-

риментальное исследования статической прочности образцов, выполненных предлагаемым способом (тип 1) и по обычной технологии (тип 2), с исходными дефектами типа трещин показали, что разрушающие напряжения повышаются для образцов типа 1 в зависимости от температуры испытаний (до 33% при $T = -55^{\circ}\text{C}$), а пределы выносливости σ_{-1K} - до 28%.

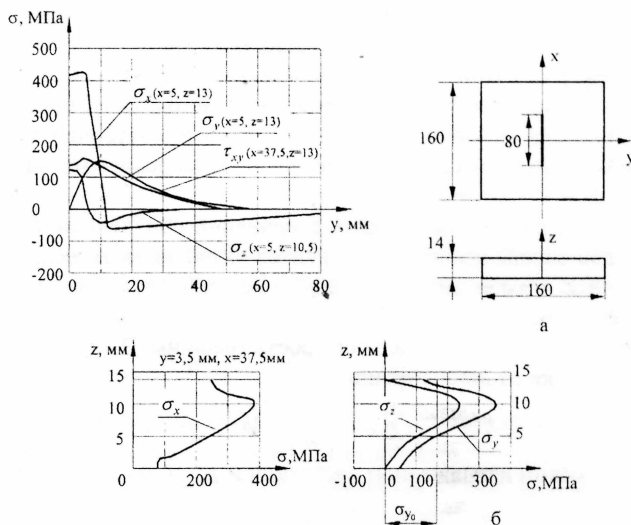


Рис. 2. Остаточные напряжения в пластине с коротким швом: а – расчетная схема; б – остаточные напряжения (режим сварки: $I=260$ А, $U=30$ В, $V_c=0,01$ м/с)

Осуществлен 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 при решении трехмерной задачи могут достигать значительных величин (до $1,6\sigma_T$).

При этом, остаточные напряжения, способные влиять на несущую способность сварных соединений, могут сохраняться при интенсивности внешней нагрузки до $0,8\sigma_T$, что согласуется с экспериментальными данными других исследователей (В.С.Игнатова).

Расчетными исследованиями показано, что при $q_{II}/\delta \geq 12500$ Дж/см² определение напряженно - деформированного состояния пластин с короткими швами можно приближенно вести по схеме плоского напряженного состояния.

Определены размеры области соединения с короткими швами, где локали-

зуются значительные остаточные деформации и высокие остаточные напряжения, что позволяет обоснованно применять принцип Сен - Венана.

Полученные в данной главе закономерности образования остаточных напряжений и деформаций в элементах и узлах крановых металлоконструкций удовлетворительно сходятся с результатами экспериментальных исследований остаточных напряжений методом отверстий в сочетании с лазерной интерферометрией, остаточных деформаций зеркально-оптическим методом и перемещений, замеренных на натурных конструкциях (до 15%).

В пятой главе рассматриваются вычислительные методы в механике разрушения сварных металлоконструкций. Приводятся методы и алгоритмы определения коэффициентов интенсивности приложенных и остаточных напряжений, энергетического J-интеграла и раскрытия трещины на основе метода конечных элементов.

Применительно к моделям сварных соединений обосновывается применение трех методов определения коэффициентов интенсивности напряжений, основанные на МКЭ: прямой, энергетический и метод J-интеграла.

При определении КИН на основе энергетического подхода наиболее эффективным является метод виртуального роста трещины. В случае независимости внешней нагрузки от длины трещины

$$K_I^2 = -\frac{E'}{2} \sum_{r=1}^N \{\delta\}^{*r} \left[\frac{\partial K}{\partial l} \right]^* \{\delta\}^r, \quad (11)$$

где $E' = E$ при плоском напряженном состоянии и $E' = E/(1 - \nu^2)$ при плоской деформации;

$\{\delta\}^r$ - узловые перемещения конечных элементов.

В методе J-интеграла используется то обстоятельство, что в случае упругого тела J-интеграл равен интенсивности освобождения упругой энергии и, следовательно, $K_I^2 = E' \cdot J$.

Указанные подходы вычисления КИН были реализованы в программных комплексах CRACK (МКЭ) и ГРАЭЛ (МГЭ). На основе численных исследований определения КИН установлено, что наиболее эффективным методом расчета КИН является метод J-интеграла. Для линейных элементов оптимальный размер в окрестности вершины трещины должен быть менее 1/60 длины трещины (не более 0,5 мм). При этом в области с характерным размером порядка длины трещины размер элементов должен плавно возрастать не быстрее, чем $1:2:4:8:\dots:2^{(N-1)}$, где N - номер слоя элементов.

В реальной практике проектирования и прогнозирования разрушения сварных конструкций важно оценить момент страгивания стационарной трещины в упругопластическом теле, нагруженном произвольной системой внешних сил. Показано, что в этом случае в качестве количественной характеристики нелинейного состояния материала в окрестности трещины можно использовать независящий от пути интеграл Черепанова-Эшелби-Райса

$$J = \int_{\Gamma} \left(W n_k - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} n_j \right) dC. \quad (12)$$

Здесь Γ - произвольный контур интегрирования; $W(\varepsilon_j)$ - плотность энергии деформации; σ_{ij} - компоненты тензора напряжений; n_j - направленный во внешнюю сторону вектор, расположенный по нормали к контуру интегрирования; u_i - перемещение точек на контуре интегрирования; x_i - декартовы координаты.

При оценке J-интеграла использовались два способа: непосредственное использование формулы (12) интегрированием по контуру Γ и энергетический метод. В последнем случае используется связь между величиной J-интеграла и производной потенциальной энергии деформации образца $J = -\partial \Pi / \partial l$.

Расчетная процедура определения J-интеграла последним способом совпадает с оценкой КИН энергетическим методом по выражению (11).

Использование (12) при расчете J-интеграла требует его модификации с целью интегрирования по контуру. В процессе приращения нагрузки накапливается тот член интеграла (12), в котором присутствует $J_n = \sum_i \Delta J'_n$, где

$$\Delta J'_n = \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \left(\{\sigma\}_{j,i}^T + \{\sigma\}_{j,i+1}^T \right) \left(\{\varepsilon\}_{j,i+1} - \{\varepsilon\}_{j,i} \right) n_k dC. \quad (13)$$

Здесь приращение деформаций $\{\Delta \varepsilon\}_j = \{\varepsilon\}_{j,i+1} - \{\varepsilon\}_{j,i}$ получается делением интервала деформирования на некоторое количество шагов.

Второе слагаемое в формуле (12) вычисляется на основе стандартных соотношений для конечного элемента. Следует отметить, что величины J_n и

$\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} n_j$ усредняются для внешних и внутренних элементов контура интегрирования с принятыми весовыми коэффициентами. На завершающем этапе вычисляется для малого k -го участка контура величина J_k . Суммирование по всей длине контура приводит к $J = \sum_i J_i$.

Показано, что расчетное определение коэффициента интенсивности остаточных напряжений также можно базировать на методе полной энергии (методе виртуального роста трещин) и методе J-интеграла. Однако применение последнего метода имеет ограничения. Это связано с тем, что в процессе определения КИОН берега трещины внутри контура интегрирования нагружены остаточными напряжениями и свойство инвариантности J-интеграла теряется. Расположение контура как можно ближе к вершине трещины позволит свести данную ошибку к минимуму.

На основе применения МКЭ развита методика определения траектории усталостной трещины с учетом влияния остаточных напряжений. Результатом расчета будет возможная траектория трещины и зависимости $\Delta l(l)$ и $\Delta K(l)$, которые используются в дальнейшем для оценки живучести сварных соединений.

Здесь, например, $\Delta K(l) = K_{\text{н}}(l) - K_{\text{м}}(l)$ с учетом остаточных напряжений.

На основе анализа существующих подходов предложены расчетно-экспериментальные зависимости для определения критерияльных параметров механики разрушения K_K , δ_K , ΔK_K и диаграммы усталостного разрушения n и C , а также метод определения критериев K_c и J_c на основе численного моделирования условий эксперимента по определению разрушающего напряжения σ_c для сварных соединений с дефектами типа трещин. С целью получения диаграммы усталостного разрушения развит алгоритм пересчета результатов стандартных испытаний материалов на выносливость. Указанные соотношения реализованы в информационно-поисковой системе МЕНПАР.

В шестой главе рассматриваются типовые образцы, моделирующие поведение основных сварных соединений. С позиций регрессионного и корреляционного анализов на основе планирования машинных экспериментов получен ряд зависимостей для параметров механики разрушения в функции геометрии трещин, приложенных и остаточных напряжений и параметров материала. Для получения представительной выборки используется правило рационального планирования экспериментов с применением ортогональных латинских квадратов. Регрессионные зависимости строятся на основе нетрадиционного подхода (М.М. Протоцьяконов) с использованием программы ANETR (КарГТУ).

С учетом сказанного, получены формулы для расчета коэффициента концентрации напряжений в стыковых и тавровых соединениях. Численный эксперимент по оценке НДС сварных соединений реализован на основе метода граничных элементов (ГМК ГРАЭЛ). Оптимальный размер граничного элемента в зоне концентратора установлен как $(0,1...0,15)R$, где R - радиус концентратора.

Изучено распределение напряжений и упругопластических деформаций в сечении угловых швов в сварных соединениях при статической нагрузке, близкой к предельной. Использовалась модель теории течения при билинейном законе упрочнения. Рассматривались два варианта условий в направлении оси Z : плоское напряженное состояние и плоская деформация. На рисунке 3 представлены некоторые результаты расчетов для нагрузки Q_y , обеспечивающей в периферийной зоне примыкающего элемента при $2a=12$ мм напряжение $\sigma_y=400$ МПа ($S_1=S_2=18$ мм; $K_x=K_y=20$ мм). В результате установлено, что на НДС в вершине несплавления существенное влияние оказывает ее размер в направлении оси Y - зазор между соединяемыми элементами. При нагружении сварных соединений с угловыми и стыковыми швами в вершине несплавления возникает объемное напряженное состояние со значительными напряжениями растяжения. Уменьшение несплавления $2a$ с 12 мм до 4 мм уменьшает значение интенсивности напряжений σ_i на 32%, при этом существенно (в 1,9 раз) снижаются пластические деформации. Уменьшение катета

шва с 20 до 10 мм резко увеличивает σ_i и ε_i до значений, при которых сплошность уже нереальна.

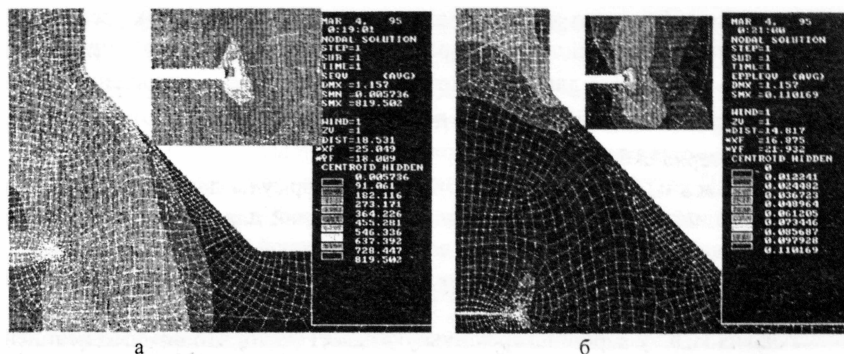


Рис. 3. Распределение интенсивностей напряжений и пластических деформаций для случая плоского напряженного состояния ($K_y=K_z=20$ мм): а - σ_i при $2a=12$ мм; б - ε_i при $2a=12$ мм

При построении регрессионной зависимости для интенсивности упругопластических деформаций в функции приложенной нагрузки, размера дефекта и механических свойств материала введен параметр

$$\varepsilon' = \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_T) E_T}{\sigma_T} \quad (14)$$

Показана независимость данного фактора от механических свойств материала (исследовалось семь марок сталей и сплавов). На основе нетрадиционного метода анализа результатов численного эксперимента получены формулы для определения ε' в стыковых и тавровых сварных соединениях с непроплавлениями а.

На основе анализа установлено, что для зоны вершины трещиноподобного дефекта и острого концентратора ($\alpha_\sigma > 2$) формула Нейбера при оценке коэффициента концентрации упругопластических деформаций дает существенную погрешность, что предопределяет актуальность формулы (14).

Как отмечалось выше, при определении скорости распространения усталостной трещины необходимо иметь аналитические зависимости для КИН в функции геометрии длины трещины и ширины образца. Для типичных образцов, моделирующих поведение сварных соединений с трещинами получены формулы для расчетов КИН. Они дают хорошую степень совпадения КИН с известными экспериментальными и численными данными, но вместе с тем имеют довольно простую структуру, что облегчает их применение.

На конкретном примере решена задача определения КИН для поверхностной полуэллиптической трещины с использованием МКЭ в трехмерной поста-

новке. Таким образом, показано, что, используя МКЭ, можно рассчитать значения КИН любых конфигураций трещины и изделия.

На основе анализа развития остаточных напряжений в сварных соединениях, выполненных короткими швами, установлено, что характер их распределения определяется следующими факторами: b_n/B - относительная ширина пластины; L/B - отношение длины к ширине пластины; l_n/b_n - отношение длины шва к ширине зоны, нагреваемой до температуры T_y , при которой предел текучести материала близок к нулю.

Основываясь на сказанном, были получены формулы для определения коэффициентов интенсивности остаточных напряжений для продольной и поперечной трещин в швах ограниченной длины в конечной пластине.

Для указанных сварных соединений решена задача определения энергетического J -интеграла.

Анализ НДС у вершины трещины указывает на то, что помимо нелинейности материала в виде пластичности необходимо учитывать геометрическую нелинейность. Найденная пластическая зона подтверждает правомерность применения δ_k - модели в случае плоского напряженного состояния. Установлено, что в диапазоне малых перемещений справедлива зависимость $J = f(\delta^2)$, где δ - раскрытие краевой трещины. Далее с ростом перемещений зависимость J от δ переходит почти в линейную. Показана независимость J -интеграла от контура интегрирования. Связь J -интеграла с раскрытием трещины δ можно представить в виде $J = m\sigma_T \cdot \delta$, где m - параметр, зависящий от пластического стеснения.

Установлены границы применимости линейной механики разрушения для краевых трещин в массивных телах и для поверхностных трещин, которые зависят от степени стеснения деформации (ПНС и ПД), размеров дефектов и уровня напряжения в нетто-сечении σ_n . Так для краевой трещины в условиях ПД с ошибкой в 15 % этот предел изменяется в функции относительной длины трещины l/b : $l/b = 0,1 - \sigma_H \leq 0,85\sigma_T$; $l/b = 0,5 - \sigma_H \leq 0,40\sigma_T$.

При определении аналитических зависимостей J -интеграла в функции приложенного напряжения, геометрии элемента конструкции с трещиной и свойств материала установлено, что для билинейно упрочняющихся материалов параметр $J_p E_T / \sigma_T^2$ не зависит от материала при развитых пластических деформациях, когда $\sigma_n > \sigma_T$. Здесь J_p - пластический J -интеграл, определяемый как $J_p = J_\phi - J_e$, где J_e - упругий, а J_ϕ - упругопластический интеграл. С учетом сказанного, получена обобщенная формула для J -интеграла

$$J_\phi = \frac{\sigma^2 l}{E} f_0(l/b) + \frac{\sigma_T^2 l(1-l/b)}{E_T} f_1(l/b, P/P_\phi). \quad (15)$$

Здесь σ - напряжение от внешней нагрузки; $f_0(l/b)$ - функция, определяемая

по формулам для КИН; $f_1(l/b, P/P_*)$ - функция, зависящая от относительной длины трещины и уровня приложенной нагрузки; $P/P_* = \sigma_b / \sigma_t (b-1)$ - относительная нагрузка.

На основе численного эксперимента рассчитаны значения функции $f_1(l/b, P/P_*)$ в табулированном виде.

С целью исследования влияния остаточных напряжений на величину J -интеграла в образцах с центральной трещиной (ПНС) рассматривается задача определения J -интеграла при совместном действии приложенных и остаточных напряжений. В качестве основных факторов использовались: l/b - относительная длина трещины; σ_n / σ_t - приложенное внешнее напряжение; σ_r / σ_t - отношение нерелаксированных остаточных напряжений к пределу текучести материала. В результате оценивается функция $\psi(\sigma_n / \sigma_t, \sigma_r / \sigma_t, l/b) = \frac{J_2}{J}$, где J - интеграл от внешней нагрузки; J_2 - интеграл от совместного действия внешних и нерелаксированных остаточных напряжений. Значение функции ψ получены в табулированном виде.

На основе экспериментальных и расчетных исследований с использованием полученных в данной главе формул выявлено существенное влияние остаточных напряжений на разрушающие напряжения сварных соединений с трещинами. Это влияние усиливается при испытаниях в условиях пониженных температур ($t^\circ = -30^\circ \dots -50^\circ \text{C}$). Используя экспериментально полученные диаграммы «нагрузка - смещение», определены критериальные характеристики упругопластической вязкости разрушения J_c в зависимости от температуры испытаний. Показано, что расчетно - экспериментальные методы по оценке вязкости разрушения на основе механических испытаний образцов - свидетелей по определению разрушающего напряжения σ_c или ударной вязкости КСЧУ обладают достаточной надежностью и могут использоваться в практике прогнозирования характеристик живучести крановых металлоконструкций.

В седьмой главе приводятся методы и алгоритмы определения статической и циклической трещиностойкости сварных соединений крановых металлоконструкций с учетом влияния остаточных сварочных напряжений и деформаций.

Алгоритм оценки статической трещиностойкости представлен на рис.4. Для удобства его реализации получены модифицированные выражения для двухпараметрических критериев прочности в терминах КИН и J -интеграла:

$$K_{\text{эф}}^{\text{max}} = \frac{K_{\text{IC}}}{n_s} \eta \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_b / n_b} \right)^2}, \quad (16)$$

$$J = \frac{J_c}{n_b} \left[1 - \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_b / n_b} \right)^{1/m} \right]^{m+1}. \quad (17)$$

Здесь n_s и n_b - коэффициенты безопасности; η - коэффициент, учитывающий

жесткость нагружения и величину притупления у примыкающей полости; σ_i - расчетное напряжение в элементе; σ_s - временное сопротивление; m - показатель упрочнения в степенной зависимости.

В выражениях (16) и (17) левая часть определяется с учетом влияния остаточных напряжений согласно формул для КИН и модифицированного уравнения (15).

На основе разработанного алгоритма осуществлен расчет напряжений σ_c для стыковых сварных соединений, выполненных двухсторонней и односторонней сваркой с неполным проплавлением. В результате установлено, что модель квазихрупкого разрушения (16) с достаточной степенью точности описывает результаты эксперимента (В.И. Махненко). Применение модели хрупкого разрушения справедливо для относительно длинных трещин $l/b > 0,5 \dots 0,6$. Учет влияния остаточных напряжений приводит к снижению допустимого размера трещины на 46% ($\sigma_r = 80$ МПа).

Анализ существующих методов оценки циклической трещиностойкости позволил заключить, что для практических расчетов, учитывая нагруженность металлоконструкции кранов (эксплуатационные нагрузки в металлоконструкциях кранов находятся в диапазоне $(0,1 \dots 0,3)\sigma_T$) при подъеме номинального груза, выводы о границе применимости линейного подхода (глава 6) и данных по разрушениям (глава 1), первостепенную важность имеют простейшие эмпирические уравнения, описывающие распространение трещины при циклическом нагружении. В основу методики прогнозирования живучести сварных соединений с трещиноподобными дефектами положена модифицированная формула Элбера (1). Остаточный ресурс соединения в этом случае выражается как

$$N_c = \frac{e^{-\lambda(R+1)}}{C_{-1}} \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{\Delta K^{m-1} \varphi(K_1^r, R)} \quad (18)$$

С учетом сказанного, алгоритм оценки циклической трещиностойкости приведен на рис. 5.

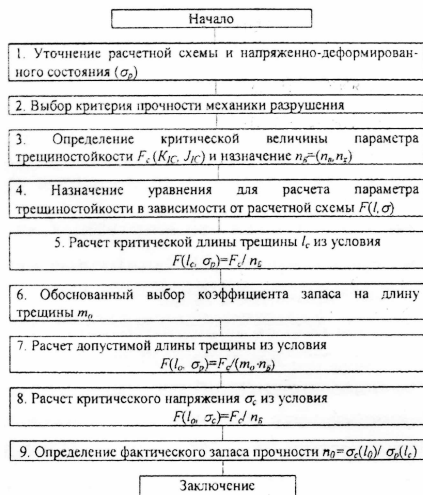


Рис. 4. Алгоритм оценки статической трещиностойкости

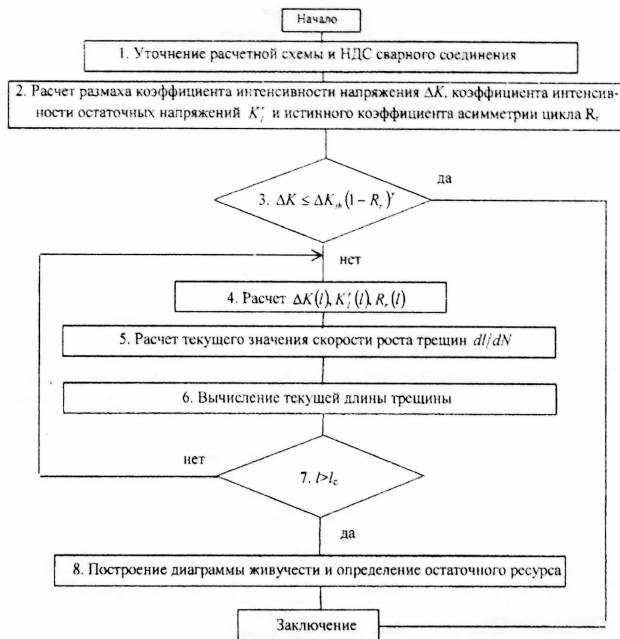


Рис. 5. Алгоритм оценки циклической трещиностойкости

Для анализа возможности продления ресурса при сохранении требований к безопасности необходимо обоснование области безопасных состояний поврежденных трещинами конструкций по критериям живучести. В рамках рассматриваемого подхода это достигается введением в критерий предельного состояния коэффициента безопасности m_k по циклической характеристике трещиностойкости K_k . Для назначения коэффициента m_{fc} используется выражение для коэффициента запаса на длину трещины m_0 . Тогда обоснованная величина коэффициента живучести $m_n \geq m_0^n$, где n показатель степени в уравнении (1). С учетом этого живучесть сварного соединения определяется как $N = N_c / m_n$, где N_c - ресурс, определяемый по выражению (18). Коэффициент живучести определяет запас по количеству циклов нагружения в условиях развития трещины.

Таким образом, можно констатировать, что проблема безопасности, живучести и ресурса крановых металлоконструкций, поврежденных трещинами, является связанной. Структура оценки остаточного ресурса крановых металлоконструкций приведена на рис. 6.



Рис.6. Структурная схема оценки характеристик живучести по критериям механики разрушения

Здесь представлен последовательный подход к методологии определения характеристик живучести: остаточной прочности (разрушающее напряжение σ_c), длительности роста трещины (остаточный ресурс) и периодичности осмотров. В блоках схемы 1-6 сконцентрированы базовые концепции безопасной эксплуатации крановых металлоконструкций по текущему техническому состоянию.

Важную практическую ценность представляет задача определения допустимого размера дефектов l_0 в сварных соединениях. При действии статических нагрузок на сварное соединение l_0 оценивается на основе расчетного определения коэффициента запаса на длину трещины m_0 , определяемого из условия возможного характера разрушения (рис.4). При действии циклических нагрузок

- из условия неподрастания трещины от острого концентратора на основе формулы для оценки зависимости предела усталости сварного соединения от размера трещиноподобного дефекта

$$\sigma_c = \frac{\Delta K_a^0}{(1-R)^{\gamma} \sqrt{l} \cdot f_0(l/b)} \quad (19)$$

Здесь ΔK_a^0 - пороговое значение размаха КИН; $\gamma=0,7$ - экспериментальный коэффициент (В.И. Труфяков); $f_0(l/b)$ - функция, зависящая от расчетной схемы.

Практическое использование (19) и сравнение с экспериментальными данными (Махненко В.И.) показало хорошую сходимость.

Проведен комплекс исследований по оценке влияния остаточных напряжений на скорость роста усталостной трещины. Согласно (1) это оценивается функцией $\phi(K', R)$. Для стыкового соединения, выполненного односторонней сваркой, с параметрами $a/\delta=0,2$ показано изменение σ_r и ϕ в зависимости от σ_r , σ_a , R и l/δ . В результате установлено, что при действии больших внешних нагрузок ($\sigma_a > 0,8\sigma_r$) растягивающие остаточные напряжения релаксируют до начала роста трещины и почти не оказывают влияния на скорость dl/dN (11%). Влияние остаточных напряжений уменьшается также с ростом коэффициента асимметрии цикла R . Можно считать, что при $R > 0,7$ влиянием остаточных напряжений можно пренебречь. При уровне внешних нагрузок $\sigma_a < 0,8\sigma_r$, а также с ростом σ_r , влияние остаточных напряжений более заметно.

Для стыкового сварного соединения с центральной трещиной из стали 15ХСНД согласно алгоритма оценки циклической трещиностойкости осуществлен ряд исследований. Полученные расчетные данные сравнивались с экспериментальными (В.И. Труфяков). Сравнение их с экспериментальными данными показывает удовлетворительную сходимость. Наиболее существенное влияние остаточные напряжения растяжения оказывают в области малых значений ΔK . При выходе трещины из зоны действия исходных остаточных напряжений растяжения скорость последних становится близкой к скорости развития в эталонном образце (функция ϕ стремится к единице). Остаточные напряжения сжатия приводят к резкому замедлению процесса роста усталостной трещины в сравнительно широком интервале изменений ΔK и длин трещин.

Сказанное выше позволило обосновать пути повышения характеристик живучести сварных соединений с трещинами, базирующиеся на наведении благоприятных полей остаточных сжимающих напряжений в зоне вершины трещины путем наложения короткого сварного валика в направлении роста трещины на расстоянии $r = (0,8 \dots 0,9)l_a$ от ее вершины, где l_a - длина валика.

На основе созданных в работе алгоритмов и программ разработана блок-схема, алгоритмическое и программное обеспечение системы автоматизированного анализа и прогнозирования характеристик живучести сварных соединений ANWELD.

Данная методика автоматизированного анализа апробирована в практике обследования крановых металлоконструкций с целью определения возможности продления их ресурса при сохранении требований безопасной эксплуатации. В приложении приведен комплексный пример для мостового крана грузоподъемностью $Q = 12,5$ т и пролетом $L = 16,5$ м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решена проблема обеспечения живучести грузоподъемных машин путем разработки методологии автоматизированного анализа и прогнозирования трещиностойкости сварных соединений и узлов крановых металлоконструкций на основе блочно-иерархического подхода к созданию расчетных моделей, охватывающих жизненный цикл изделия.

2. Разработана классификация видов разрушения крановых металлоконструкций, выявлены наиболее типичные разрушения и основные факторы, снижающие их несущую способность. Общим для большинства разрушений является существование до разрушения трещиноподобных дефектов, конструктивных несплошностей, инициирующих хрупкое разрушение задолго до достижения напряжениями предела прочности материала либо появление усталостных трещин. Важную роль при этом в развитии разрушения играют остаточные сварочные напряжения и деформации.

Предложена модель учета влияния остаточных напряжений и деформаций на прочность сварных соединений.

3. Показано, что система "грузоподъемная машина-совокупность технологий" представляет собой многоуровневую систему, адекватный анализ которой достигается с помощью метода, основанного на понятии типовой Q - схемы, реализующей особенности непрерывно-стохастического процесса обслуживания.

Разработан многоцелевой моделирующий интерфейс, позволяющий в автоматизированном режиме генерировать структуру имитационной модели "машина-совокупность технологий" и GPSS-программы, для определения режима работы грузоподъемной машины.

Показано, что в процессе макроанализа системы "машина-совокупность технологий" для оценки динамических нагрузок наиболее эффективным подходом является представление металлоконструкции грузоподъемной машины и ее элементов как системы с дискретно-распределенными параметрами.

4. Разработан метод анализа систем с распределенными параметрами на микроуровне, предназначенный для решения широкого класса физически нелинейных задач с привлечением неизотермической теории течения. Предложенный метод характеризуют:

применение теории теплопроводности для определения нестационарных полей температур в процессе сварки;

использование метода конечных элементов при интегрировании дифференциальных уравнений неизотермической теории течения;

применение степенного изотропного упрочнения изделия, удовлетворяющего критерию текучести Мизеса.

Его отличие по сравнению с существующими подходами заключается в:

использовании шагового метода нагружения в термическом и силовом циклах на основе итерационной процедуры метода Ньютона - Рафсона с α -ускорением сходимости;

применении уравнения связи между напряжениями и деформациями в форме приращений совместно с коррекцией напряжений методом радиального возврата в конце каждого шага интегрирования;

определении перехода конечных элементов из упругого состояния в пластическое на основе оценки коэффициента r , показывающего какая часть приращения деформаций при нагружении является упругой;

имитации образования сварного соединения путем наложения дополнительных граничных условий вдоль линии сплавления.

Показано, что для оценки упругой концентрации напряжений наиболее эффективным методом является метод граничных элементов в варианте метода фиктивных нагрузок.

5. Создан программно-методический комплекс определения остаточных сварочных напряжений и деформаций, в том числе и объемных, КЭЛАПС.

Расчетными исследованиями образования остаточных сварочных напряжений и деформаций установлено следующее:

возможность возникновения объемных напряжений растяжения в протяженных сварных соединениях связана с отношением ширины зоны, нагреваемой до температуры предельного упругого состояния металла, к толщине пластины δ ;

в зонах концов коротких швов и в местах их пересечения возникновение объемных напряжений растяжения связано с величиной удельной погонной энергии сварки q_n/δ ; при значениях $q_n/\delta < 12500$ Дж/см² величина σ_z достигает $(0,3...0,5)\sigma_T$;

размеры области соединений с короткими швами, где локализуются значительные остаточные напряжения и деформации, определяются отношением ширины зоны, нагреваемой до температуры предельного упругого состояния металла, к длине шва.

Обоснован способ приварки элементов жесткости короткими швами, предусматривающий разделение конструктивного и технологического концентраторов напряжений.

6. Разработаны численные методы расчета параметров трещиностойкости сварных соединений, научно обоснованные в рамках механики разрушения и базирующиеся на следующем:

расчет параметров механики разрушения осуществляется путем решения задач теории упругости и пластичности методами граничных и конечных элементов;

энергетический J-интеграл определяется численным интегрированием по контуру в вершине трещины;

коэффициент интенсивности остаточных напряжений рассчитывается на основе метода полной энергии в сочетании с методом податливости, а коэффициент интенсивности от внешней нагрузки - на основе метода J-интеграла;

оценка критериальных параметров механики разрушения реализуется расчетно - экспериментальными методами путем пересчета результатов испытаний материалов на статическую прочность и выносливость.

7. На основе исследования напряженно-деформированного состояния типовых сварных соединений с трещиноподобными дефектами крановых металлоконструкций установлены закономерности упругопластической концентрации напряжений и деформаций, которые позволили получить:

выражения для коэффициента концентрации упругих напряжений в зависимости от геометрии сварного соединения;

выражение для эквивалентной пластической деформации у вершины конструктивных несплошностей в функции геометрии, приложенной нагрузки и механических параметров материала;

формулы для расчета коэффициентов интенсивности остаточных напряжений и напряжений от внешней нагрузки в зависимости от длины трещины и приложенной нагрузки;

табулированные формулы для определения J-интеграла в функции от приложенных внешних и остаточных напряжений, геометрии изделия с трещиной и свойств материала.

Установлено, что при нагружении сварных соединений с угловыми и стыковыми швами статической нагрузкой в поперечном сечении шва возникает объемное напряженное состояние со значительными напряжениями растяжения ($\sigma > 0,7\sigma_T$). Показано, что в зонах вершины трещиноподобного дефекта и острых концентраторов ($\alpha_s > 2,0$) формула Нейбера при оценке коэффициента концентрации деформации K_ϵ дает существенную погрешность. При этом фактор $K_\epsilon K_s / \alpha_s^2$ уменьшается до определенных величин, зависящих от α_s , при внешней нагрузке равной $(0,75 \dots 0,85)\sigma_T$, что соответствует напряжению в нетто-сечении $\sigma = \sigma_T$. Определены границы применимости линейной механики разрушения для сварных соединений с краевыми и центральными трещинами.

8. Из результатов численного анализа статической и циклической трещиностойкости сварных соединений с трещиноподобными дефектами крановых металлоконструкций вытекает, что их оценка должна базироваться на:

двухпараметрических критериях разрушения в терминах коэффициента интенсивности напряжений и J-интеграла;

модифицированной формуле Элбера для расчета живучести сварных соединений с трещинами;

учете влияния остаточных напряжений на скорость роста усталостной трещины через функцию $\phi(K'_1, R)$, где K'_1 - коэффициент интенсивности остаточных напряжений, а R - коэффициент асимметрии цикла;

определении допустимого размера дефекта при действии статических нагрузок на основе коэффициента запаса на длину трещины, при действии циклических нагрузок с использованием формулы, полученной из условия неподрастания трещины от острого концентратора;

возможности продления ресурса крановых металлоконструкций с трещинами при сохранении требований безопасности путем введения в критериальные соотношения механики разрушения обоснованных коэффициентов трещиностойкости и живучести.

На основе сказанного разработаны математические модели трещиностойкости сварных соединений с дефектами с учетом остаточных напряжений и деформаций.

9. Установлено, что степень влияния остаточных напряжений на статическую и циклическую трещиностойкость существенно зависит от уровня приложенной нагрузки, предела текучести материала и коэффициента асимметрии внешнего нагружения. Влияние остаточных напряжений на статическую трещиностойкость сварных соединений усиливается при испытании в условиях пониженных температур ($t^0 = -30^\circ \dots -50^\circ \text{C}$). При уровне внешних нагрузок, соответствующих $\sigma_p < 0,8\sigma_T$ и коэффициента асимметрии цикла $R < 0,7$ учет влияния остаточных напряжений обязателен. Наибольшее влияние остаточного напряжения растяжения проявляется в областях малых значений $\Delta K \geq \Delta K_{th}$. Сжимающие остаточные напряжения приводят к резкому замедлению процесса роста усталостной трещины в сравнительно широком интервале изменений величины ΔK .

10. На основе разработанных методов оценки статической и циклической трещиностойкости сварных соединений с трещиноподобными дефектами создана методика инженерного расчета характеристик живучести крановых металлоконструкций. Данная методика используется в практике обследования крановых металлоконструкций на предприятиях Центрального Казахстана с целью определения возможности продления их ресурса безопасной эксплуатации.

Обоснованы пути повышения живучести крановых металлоконструкций, предусматривающие наведение благоприятных полей остаточных сжимающих напряжений в зоне вершины трещины.

11. Применение компьютерной автоматизированной системы анализа и прогнозирования характеристик живучести ANWELD и ее подсистем, охваты-

вающих жизненный цикл изделия, позволяет создать совершенные сварные крановые металлоконструкции, соответствующие назначению при рациональном расходовании конструкционных материалов, а также решать вопросы о возможности их сверхнормативной эксплуатации.

Содержание диссертации изложено в 65 опубликованных работах, основные из которых приведены ниже:

1. Вершинский А.В., Нургужин М.Р., Базарбаев С.С. Определение объемных остаточных напряжений и деформаций в сварных узлах крановых металлоконструкций // Труды МВТУ. - 1985. - N 438. - С. 97-113.
2. Нургужин М.Р. Определение остаточных деформаций и напряжений при приварке элементов жесткости в балках мостовых кранов // Известия вузов. Машиностроение. - 1985. - № 10. - С. 104-108.
3. Нургужин М.Р. Особенности расчетного определения остаточных деформаций и напряжений в сварных пространственных узлах крановых металлоконструкций // Конструирование и эксплуатация в ИТМ: Межвуз. сб. - Тула, 1985. - С. 16-26.
4. Нургужин М.Р. Анализ развития остаточных напряжений и деформаций в сварных крановых металлоконструкциях методом конечных элементов // Исследование оптимальных металлоконструкций и деталей подъемно-транспортных машин. Оптимизация и прочность конструкций : Межвуз. научн. сб. (Саратов). - 1987. - Вып.5. - С. 17-23.
5. Нургужин М.Р. Применение конечноэлементных графов в расчетах прочности металлоконструкций // Известия вузов. Машиностроение. 1988. - № 7. - С. 6-9.
6. Степанов П.Б., Нургужин М.Р., Альтер И.М. Основы автоматизированного расчета деталей машин методом конечных элементов: Учебное пособие. - Караганда: КарПИИ, 1988. - 93 с.
7. Нургужин М.Р. К расчетному определению остаточных сварочных напряжений и деформаций и их взаимодействие с напряжениями от внешней нагрузки // Автоматическая сварка. - 1990. - № 5. - С.70 (Деп. рук. ВИНТИ. - 1990г. - №1192 - В20. - 10 с.).
8. Вершинский А.В., Нургужин М.Р., Альтер И.М. Математическое моделирование параметров прочности сварных конструкций // Сварные конструкции: Тезисы докл. Международной конференции. - Киев, 1990. - С. 163.
9. Нургужин М.Р. Особенности применения метода конечных элементов в строительной механике сварных крановых металлоконструкций // Проблемы развития и совершенствования подъемно-транспортной и складской техники и технологии: Тезисы докл. II Всесоюзной научно-технической конференции. - М., 1990. - С. 34-35.

10. Авторское свидетельство № 1566051. Механизм соединения сварной опалубки / В.А. Полянский, А.М. Ткаченко, И.М. Альтер, М.Р. Нургузин // Изобретения и открытия. - 1990. - №19.
11. Нургузин М.Р. Математическое моделирование в механике разрушения // Моделирование и разработка машин и систем машин: Сб. научн. трудов. - Караганда: КарПТИ, 1990. - С. 57-59.
12. Разработка подсистем анализа элементов ПТМ в САПР / М.Р. Нургузин, И.М. Альтер, Л.М. Кузнецов, С.С. Ахметов // Новое в ПТМ: Тезисы Всесоюзной конференции - М., 1991. - С.3-4.
13. Альтер И.М., Нургузин М.Р., Кузнецов Л.Н. Metallokonstruktsii mekhanizirovannykh krep'ey. - Алматы: Гылым, 1991. - 128с.
14. Авторское свидетельство № 1749485. Крепь-опалубка / В.А. Полянский, П.В. Степанов, И.М. Альтер, С.С. Ахметов, М.Р. Нургузин // Изобретения. - 1992. - №27.
15. Пути развития и совершенствования механизированных крепей / С.С. Жетесов, А.Г. Лазуткин, А.С. Сагинов, М.Р. Нургузин. - Алматы: Гылым, 1992. - 280 с.
16. Нургузин М.Р. Прогнозирование остаточного ресурса сварных металлоконструкций на основе механики разрушения // Производство и надежность сварных конструкций: Тезисы научно-технической конференции стран СНГ. - М., 1993. - С.7.
17. Vershinsky A.V., Nurguzhin M.R. Influence of Volume Residual Stress and Strain to Strength Parameters of Welds // Fracture mechanics. Success and Problems: Abstr. of. International Conf. ICF-8. - Kiev, 1993. - P. 579-580.
18. Нургузин М.Р., Степанов П.Б. Прикладная теория систем. Микро- и макро-моделирование: Учебное пособие. - Караганда: КарПТИ, 1994. - 132 с.
19. Нургузин М.Р., Вершинский А.В. Вычислительные методы в механике разрушения сварных конструкций // Сварные конструкции: Тезисы докл. Международной конференции. - Киев, 1995. - С. 31.
20. Нургузин М.Р. Основы автоматизированного анализа и прогнозирования живучести машиностроительных конструкций // Технические средства и программное обеспечение автоматизированных систем: Сб. научн. трудов. - Караганда, 1995. - С. 3-10.
21. Нургузин М.Р. Имитационное моделирование систем типа "машина - совокупность технологий" // Известия Вузов. Машиностроение. - 1996. - № 1-3. - С. 28-34.
22. Нургузин М.Р., Даненова Г.Т., Вершинский А.В. Автоматизированный анализ разрушения сварных конструкций // Автоматическая сварка. - 1996. - № 10. - С. 10-14.
23. Нургузин М.Р. Прикладная теория систем. Мета моделирование: Учебное пособие. - Караганда: КарГТУ, 1996. - 114 с.

24. Несущая способность крановых металлоконструкций при пониженных температурах / А.В. Вершинский, Ж.Н. Касымбек, М.Р. Нургузин, С.С. Базарбаев.- Алматы: Гылым, 1997. - 307 с.
25. Нургузин М.Р., Даненова Г.Т. Применение J-интеграла в анализе сварных металлоконструкций // Изденис - Поиск. - 1997. - №5. - С. 159-165.
26. Nurguzhin M.R., Danenova G.T. Application of J-integral in the analysis of welded constructions // DESIGN, SIMULATION and OPTIMISATION. Reliability and Applicability of Computational Methods: Proceeding of NAFEMS World Congress'97. – Stuttgart (Germany), 1997. - Vol. 1. - P. 513-521.
27. Nurguzhin M.R., Katsaga T. Ja. Non-linear analysis of a welded joint with defects as cracks // DESIGN, SIMULATION and OPTIMISATION. Reliability and Applicability of Computational Methods: Proceeding of NAFEMS World Congress'97. - Stuttgart (Germany), 1997. - Vol. 1. - P. 422-426.
28. Creation effective methods of stabilization of geometrical parameters and rising of carrying capacity of welded metal constructions / I.M. Alter, M.R. Nurguzhin, V.M. Sagalevich, G.N. Nasirov // International Conf. on Welded Structures: Proceeding. – Kiev, 1995. - London, 1997. – P.74 – 81.
29. Нургузин М.Р. Модели разрушений сварных крановых металлоконструкций // Сварка и родственные технологии - в XXI век: Тез. докл. Международной конференции. - Киев, 1998. – С.51.
30. Нургузин М.Р. Анализ разрушений сварных крановых металлоконструкций // Труды Университета (Караганда). - 1997. - Вып.2. - С. 71-77.
31. Нургузин М.Р. Алгоритмы оценки статической и циклической трещиностойкости сварных соединений методами механики разрушения // Наука и образование – ведущий фактор стратегии "Казахстан 2030": Труды Международной научной конференции. – Караганда, 1998. - С.613-615.
32. Nurguzhin M.R., Danenova G.T., Katsaga T.Ja. Application of FEM in the analysis of welded constructions with defects as cracks // Eighth International ANSYS Conference and Exhibition: Proceeding. - Pittsburgh (Pennsylvania), 1998. – P.121 – 127.
33. Нургузин М.Р., Даненова Г.Т., Кацага Т.Я. Интегрированная технология проектирования - платформа для будущего // Автоматика и информатика. - 1998. - № 1.- С. 14-19.

Подписано в печать "01" де 1999 г. Объем 2.0 п.л. Заказ 2179. Тираж 100 экз.

Издательство КарГТУ. Адрес: 470075, Караганда, Бульвар Мира, 56