

На правах рукописи

Зимонин Евгений Александрович

**ВЛИЯНИЕ СЖИМАЮЩЕЙ ЧАСТИ ЦИКЛА
ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО НАГРУЖЕНИЯ
НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск,
2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» на кафедре «Строительные конструкции»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»
(г. Магнитогорск)
Емельянов Олег Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Металлические конструкции и испытания сооружений»
ГОУ ВПО «КГАСУ» (г. Казань)
Кузнецов Иван Леонидович

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения»
ГОУ ВПО «ЮУрГУ» (г. Челябинск)
Тиньгаев Александр Кириллович

Ведущая организация: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко
(г. Москва)

Защита состоится «2» июля 2010 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Отзывы на автореферат просим высылать в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», диссертационный совет ДМ 212.298.08, ученому секретарю Трофимову Б.Я.

Автореферат разослан «____» _____ 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
Доктор технических наук, профессор,
Советник РААСН

Б.Я. Трофимов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных экономических условиях проблема обеспечения безопасной эксплуатации производственных зданий и сооружений неразрывно связана с разработкой эффективных мер по снижению стоимости, повышению надежности и долговечности конструкций. Применительно к производству сварных металлических конструкций (МК) решение этой задачи связано с выполнением комплекса работ, включающих совершенствование методики расчета, применение экономических профилей металлопроката, создание новых прогрессивных решений соединений, снижающих расход металла, трудоемкость изготовления и монтажа, эксплуатационные расходы и повышающих надежность конструкций.

В существующих нормах (СНиП II – 23 – 81*) расчета сварных МК на выносливость отсутствуют рекомендации, позволяющие учитывать нерегулярность нагружения, вероятность наличия исходных технологических дефектов, возможность зарождения из дефектов сварки усталостных трещин, их дальнейшее развитие и влияние уровня сжимающей части цикла знакопеременного нагружения.

С учетом вышеизложенного актуальной является проблема совершенствования методики оценки долговечности МК при эксплуатационных воздействиях в случае наличия несовершенств и технологических дефектов.

В последние четыре десятилетия определенные успехи в решении указанной проблемы связаны с применением методов механики разрушения, позволяющих разрабатывать математические модели для описания процесса роста трещин, учитывающих влияние ряда факторов эксплуатационного нагружения, и на базе этих моделей выполнять расчетную оценку долговечности и надежности элементов конструкций и сооружений.

Цель работы. Совершенствование методики расчета долговечности элементов МК, учитывающей наличие в расчетных сечениях исходных технологических дефектов, макротрещин и влияние на их развитие сжимающей части цикла знакопеременного нагружения.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1) Изучить закономерности перераспределения напряжений в окрестности вершины трещины при различных коэффициентах асимметрии цикла регулярного знакопеременного нагружения.

2) Исследовать закономерности влияния величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на кинетику перераспределения активных и остаточных напряжений в окрестности вершины трещины и на скорость роста усталостных трещин (РУТ).

3) Изучить влияние пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при однократном и циклическом знакопеременном нагружении, на величины максимального коэффициента интенсивности напряжений K_{max} и размаха КИН ΔK .

4) Исследовать закономерности влияния величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на развитие пластических деформаций в вершине трещины при циклическом нагружении.

5) Разработать модель определения эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений при регулярном знакопеременном нагружении.

6) Усовершенствовать методику расчета долговечности элементов металлических конструкций, учитывающую наличие в расчетном сечении исходных технологических дефектов и макротрещин, период развития которых до критических размеров определяет срок службы конструкции, и влияние на их развитие величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения.

Научную новизну работы составляют:

1) Закономерности кинетики перераспределения активных и остаточных сжимающих напряжений при различных коэффициентах асимметрии цикла регулярного знакопеременного нагружения.

2) Закономерности влияния пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при однократном и знакопеременном циклическом нагружении, на величины максимального коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_{max} и размаха КИН ΔK .

3) Модель определения эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений при регулярном знакопеременном нагружении.

4) Усовершенствованная методика расчета долговечности элементов металлических конструкций, в сечениях которых возможно наличие исходных технологических дефектов и макротрещин, период развития которых до критического размера определяет срок службы конструкции, и влияние на их развитие величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты использованы при совершенствовании инженерной методики расчета усталостной долговечности металлических конструкций и их элементов, воспринимающих в процессе эксплуатации циклические воздействия. Указанная методика позволяет оценить влияние на рост усталостных трещин величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения.

Внедрение результатов. Настоящая работа выполнена в соответствии с грантом Правительства Челябинской области «Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области».

Методика расчета долговечности элементов циклически нагружаемых МК нашла практическое применение при прогнозировании срока службы конструкций и сооружений, обследуемых и проектируемых объектов ОАО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ» и ЗАО МНТЦ «Диагностика» (г. Магнитогорск).

Апробация работы. Основные результаты работы были обсуждены и одобрены на 4-х международных научно-технических конференциях («Эффективные строительные конструкции: Теория и практика», Пенза, 2005; «Эффективные строительные конструкции: Теория и практика», Пенза, 2007; «Инновационные технологии и повышение надежности и долговечности строительных конструкций», Владивосток, 2007; «Строительство и образование», Екатеринбург, 2007), а также на 65-ой и 66-ой научно-технических конференциях в ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» в 2008 и 2009 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 статей.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка использованных источников. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, включающего 90 рисунков, 8 таблиц, списка использованных источников из 190 наименований.

На защиту выносятся:

1) Закономерности влияния пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при однократном и циклическом нагружении на величины максимального значения КИН K_{max} и размаха КИН ΔK .

2) Закономерности кинетики перераспределения перед фронтом трещины активных и остаточных сжимающих напряжений при различных коэффициентах асимметрии цикла регулярного знакопеременного нагружения.

3) Модель определения эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений при регулярном знакопеременном нагружении, основанная на учете взаимодействия активных и остаточных сжимающих напряжений перед фронтом трещины.

4) Усовершенствованная методика расчета долговечности элементов металлических конструкций, учитывающая наличие в расчетных сечениях исходных технологических дефектов и макротрещин, период подрастания которых до критических размеров определяет срок службы конструкции, и влияние на их развитие величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена цель диссертационной работы, дано обоснование ее актуальности, отмечены научная новизна и практическая ценность работы, а также положения, вынесенные на защиту.

Первая глава работы посвящена обоснованию задач исследования на основе анализа причин разрушения металлических конструкций при эксплуатационных режимах нагружения и методов их расчета на усталость.

Показано, что при массовом изготовлении сварных МК наличие в них дефектов сварки в виде пор, подрезов, непроваров и т.д. практически неизбежно. При циклических воздействиях (даже сравнительно низкого уровня) дефекты сварки трансформируются в усталостные трещины. Сочетание таких неблагоприятных факторов, как конструктивная концентрация напряжений от нагрузки, наличие дефектов сварки и остаточных сварочных напряжений значительно сокращает период инициации усталостных трещин, который может составлять не более 5-12% от общей долговечности конструкции, и процесс снижения несущей способности элементов конструкций во времени определяется главным образом кинетикой развития трещин. Поэтому для обеспечения надежности сварных МК необходимо прогнозировать кинетику развития усталостных трещин и вероятное предельное состояние сечений (недопустимое снижение несущей способности расчетного сечения вследствие ослабления его трещиной, разгерметизация резервуаров и др.), в которых развиваются трещины.

Исследованию кинетики развития усталостных трещин и анализу долговечности посвящены работы С.В. Серенсена, В.В. Болотина, В.П. Кагаева, Н.А. Махутова, Д. Броека др. Влияние ряда факторов эксплуатационного нагружения на процесс распространения усталостных трещин изучено в работах Уиллера, Элбера, А.Б. Злочевского, А.Н. Шувалова, Л.А. Бондаровича, О.В. Емельянова, И.А. Лядецкого и др.

Существующие теоретические модели РУТ затрагивают в основном проблемы влияния растягивающих перегрузок или снижения уровня циклической нагрузки, коэффициента асимметрии цикла эксплуатационного нагружения при $R \geq 0$ на кинетику РУТ. При этом ни одна из существующих моделей роста трещины не позволяет учесть влияние величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на скорость ее развития. Между тем имеющиеся данные показывают, что при одинаковом уровне растягивающей части цикла увеличение величины сжимающей части цикла нагружения вызывает увеличение скорости роста трещины.

Исследования реальных режимов нагружения различных металлоконструкций показывают, что в опасных сечениях элементов некоторых конструкций (дымовые трубы, башни, мачты и т.д.) коэффициент асимметрии цикла нагружения в процессе эксплуатации периодически изменяется как по величине так и по знаку в диапазоне от -6 до 0,8.

Поэтому для оценки долговечности и надежности элементов высотных конструкций необходимо иметь модель накопления повреждений, позволяющую учитывать влияние величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на скорость накопления повреждений.

Цель и задачи исследования сформулированы в конце первой главы.

Во второй главе изложены методики исследования напряженного состояния перед вершиной трещины при упругопластическом деформировании материала, определения КИН, выполнено обоснование выбора образца и сталей для исследования.

Изучение кинетики напряженного состояния материала в вершине трещины при различных коэффициентах асимметрии цикла знакопеременного циклического нагружения выполняли методом конечных элементов (МКЭ).

Для выявления закономерностей влияния сжимающей части цикла знакопеременного нагружения ($R < 0$) на кинетику НДС материала в вершине трещины необходимо, чтобы при приложении сжимающей нагрузки эпюра напряжений по всему сечению образца вдоль плоскости трещины была равномерно распределенной. Данному критерию в полной мере отвечает образец с центральной трещиной.

При изучении кинетики НДС были использованы данные об упругих и пластических свойствах сталей Ст20, ВСтЗсп, 09Г2С, 15Г2СФ в виде диаграмм деформирования, полученных по единой методике с использованием малогазных тензорезисторов. Все указанные стали являются циклически стабильными, а их механические свойства охватывают весь диапазон механических свойств строительных сталей.

Значения КИН вычисляли используя уравнения линейной упругой механики разрушения, энергетические методы и непосредственно по полю напряжений.

В третьей главе изложены и проанализированы результаты экспериментального исследования кинетики НДС материала в окрестности вершины трещины при статическом и знакопеременном циклическом нагружении.

Влияние знакопеременного циклического изменения нагрузки на напряженное состояние в окрестности вершины трещины изучали при регулярном нагружении при $R = -5, 5 \dots 0$.

Установлено, что при нагружении и разгрузке в вершине трещины протекают неупругие деформации материала, вызывающие перераспределение напряжений в ее окрестности. При этом внутри монотонной пластически деформированной зоны образуется циклическая пластическая зона. Чем больше размах ΔK , тем больше величина перераспределения напряжений, а, следовательно, размер зоны циклических пластических деформаций, протекающих в вершине трещины. Зависимость $\Delta \sigma_y / \Delta \sigma_y^{yp} - K_{max}$ ($\Delta \sigma_y$ – размах напряжений в вершине трещины при упругопластическом деформировании материала; $\Delta \sigma_y^{yp}$ – размах напряжений в вершине трещины в случае упругой работы материала) не зависит от R и для циклически стабильных сталей инвариантна к марке стали (рисунок 1).

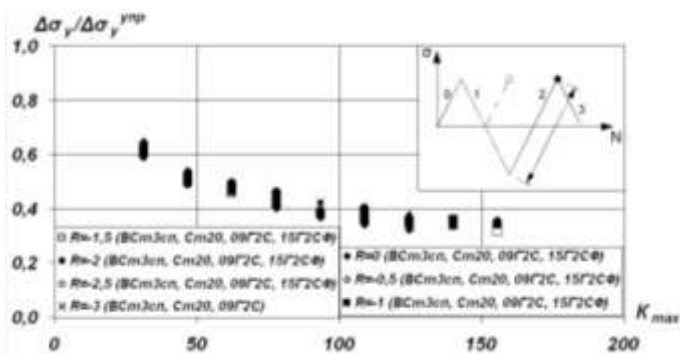


Рисунок 1 – Изменение отношения $\Delta\sigma_y / \Delta\sigma_y^{упр}$ при $r / r_u = 0$ от величины K_{max}

Неупругие деформации, протекающие в вершине трещины при воздействии растягивающей части цикла нагружения, в процессе снижения нагрузки вызывают появление при относительной величине текущей нагрузки $P^{mek} / P_{max} = 0,63-0,82$ в ее окрестности остаточных сжимающих напряжений. При этом протекают два противоположных процесса – рост остаточных сжимающих напряжений по мере уменьшения нагрузки и снижение остаточных напряжений в результате перераспределения напряжений вследствие протекания циклических пластических деформаций сжатия внутри монотонной пластически деформированной зоны.

Развитие пластических деформаций в вершине трещины при циклическом знакопеременном нагружении и их влияние на величину КИН. Для оценки влияния циклических пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при знакопеременном нагружении в процессе растяжения и сжатия на величину ΔK при различных значениях нагрузки P_{max} и R были определены значения размаха КИН методом J -интеграла ($\Delta K_J^{упр}$ и $\Delta K_J^{упр,пл}$) и непосредственно по полю напряжений ($\Delta K_{\sigma}^{упр,пл}$). Установлено, что развитие циклических пластических деформаций материала в вершине трещины при значении $\Delta K^{\sigma \dot{\epsilon}} / S_T \sqrt{1 - \dot{\epsilon} \dot{\epsilon}} < 2,3$ не приводит к увеличению величин размахов ΔK , а, следовательно, и максимальных значений коэффициента интенсивности напряжений по сравнению с упругим случаем (рисунок 2). Зависимость $\Delta K_J^{упр,пл} / \Delta K_J^{упр} - \Delta K^{\sigma \dot{\epsilon}} / S_T \sqrt{1 - \dot{\epsilon} \dot{\epsilon}}$ ($\Delta K_J^{упр,пл}$ и $\Delta K_J^{упр}$ – размах КИН при упругопластической и упругой работе материала, S_T – циклический предел текучести стали) инвариантна к марке стали и коэффициенту асимметрии цикла нагружения.

Таким образом, в инженерных расчетах при прогнозировании долговечности элементов металлических конструкций на стадии развития трещины использование уравнений линейной упругой механики разрушения для вычислений размахов и максимальных значений коэффициента интенсивности напряжений при циклическом знакопеременном изменении нагрузки является правомерным.

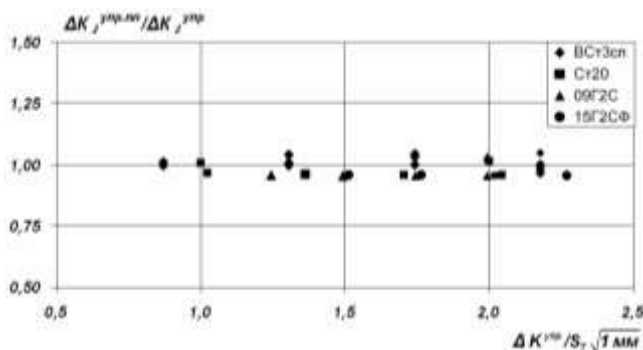


Рисунок 2 – Зависимость в координатах $\Delta K_{J}^{упр.пл} / \Delta K_{J}^{упр} - \Delta K^{упр} / S_T \sqrt{1-i}$ при циклическом изменении нагрузки ($R = -5,5 \div 0$)

В процессе изучения были также выявлены закономерности влияния величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на размер зоны циклических пластических деформаций. Установлено, что отношение размеров зон циклических пластических деформаций $\Delta r_{ц}^{(R<0)} / \Delta r_{ц}^{(R=0)}$ ($\Delta r_{ц}^{(R=0)}$ и $\Delta r_{ц}^{(R<0)}$ – размеры зон циклических пластических деформаций в направлении развития трещины за полный размах напряжений при $R=0$ и $R<0$) инвариантно к марке стали и с ростом уровня напряжений сжатия $|\sigma_{сж} / S_T|$ увеличивается.

Зависимость между отношением $\Delta r_{ц}^{(R<0)} / \Delta r_{ц}^{(R=0)}$ и уровнем напряжений сжимающей части цикла нагружения $|\sigma_{сж} / S_T|$ путем регрессионного анализа экспериментальных данных была аппроксимирована выражением:

$$\Delta r_{ц}^{(R<0)} / \Delta r_{ц}^{(R=0)} = -77,814(|\sigma_{сж} / S_T|)^4 + 76,868(|\sigma_{сж} / S_T|)^3 - 17,779(|\sigma_{сж} / S_T|)^2 + 3,6465(|\sigma_{сж} / S_T|) + 1. \quad (1)$$

Влияние сжимающей части цикла при регулярном циклическом знакопеременном нагружении на формирование остаточных сжимающих напряжений в окрестности вершины трещины. При приложении сжимающей части цикла знакопеременного нагружения берега трещины смыкаются и передают силовой поток. С этого момента трещина перестает быть концентратором напряжений. Данный этап сопровождается дальнейшим протеканием циклических пластических деформаций сжа-

тия в пределах монотонной пластической зоны, перераспределением напряжений в окрестности вершины трещины и снижением остаточных напряжений сжатия.

При фиксированных значениях K_{max} величина и протяженность остаточных сжимающих напряжений (рисунок 3), формирующихся в окрестности вершины трещины после приложения сжимающей части цикла нагружения для каждой из исследованных сталей тем меньше, чем больше уровень сжимающей части цикла нагружения (меньше значение R).

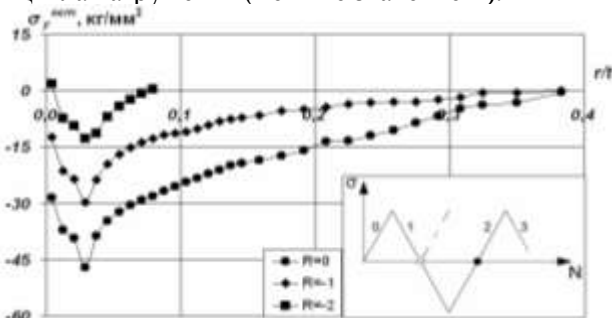


Рисунок 3 – Распределение остаточных сжимающих напряжений в окрестности вершины трещины (сталь 09Г2С, $K_{max} = 124,35$ кг/мм^{3/2})

Отношение величины остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в вершине трещины после приложения сжимающей части цикла нагружения к размаху напряжений за растягивающую часть цикла нагружения для циклически стабильных сталей, инвариантно марке стали, толщине металлопроката (при толщинах металлопроката до 25 мм), величине максимального коэффициента интенсивности напряжений и зависит только от коэффициента асимметрии цикла нагружения (рисунок 4).

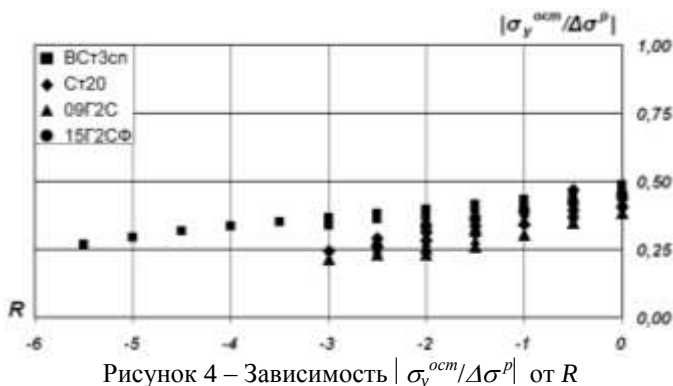


Рисунок 4 – Зависимость $|\sigma_y^{ост} / \Delta \sigma^P|$ от R

С целью интегрального отображения процесса циклического деформирования материала в окрестности вершины трещины (процесса накопления усталостных повреждений) предложено использовать в расчетах эффективную величину номинального размаха КИН:

$$\Delta K_{eff} = U_{eff} \times \Delta K, \quad (2)$$

$$\text{где } U_{eff} = 1 - |\sigma_y^{ocm} / \Delta \sigma^p|. \quad (3)$$

Зависимость между U_{eff} и R путем регрессионного анализа экспериментальных данных (рисунок 3) была аппроксимирована выражением:

$$U_{eff} = -0,0004 \times R^4 - 0,0055 \times R^3 - 0,0277 \times R^2 - 0,1016 \times R + 0,57 \quad (4)$$

Для описания РУТ при знакопеременном циклическом нагружении уравнение Пэриса предложено записывать

- для сквозной трещины:

$$dl / dN = C_{eff} (\Delta K_{eff})^n \quad (5)$$

- для поверхностной трещины:

$$d\bar{n}/dN = C_{eff} (\Delta K_{\bar{n} eff})^n \quad (6)$$

$$da/dN = C_{eff} (\Delta K_{a eff})^n \quad (7)$$

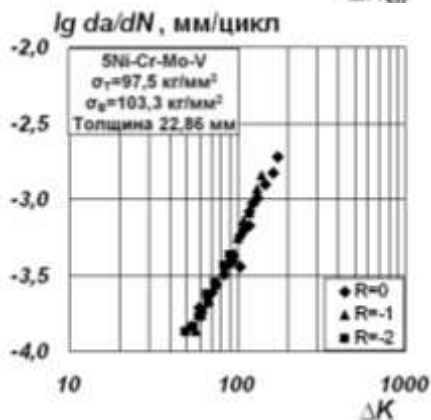
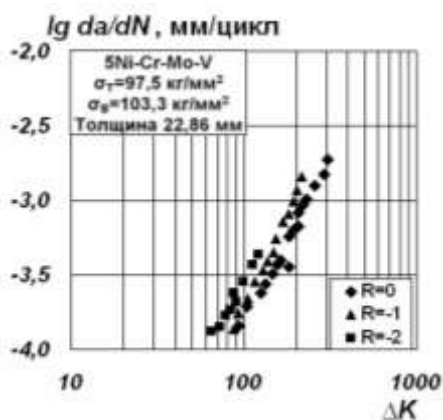
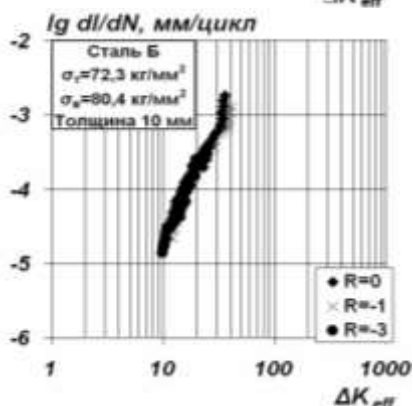
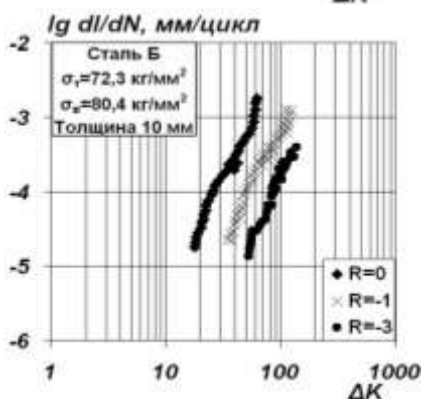
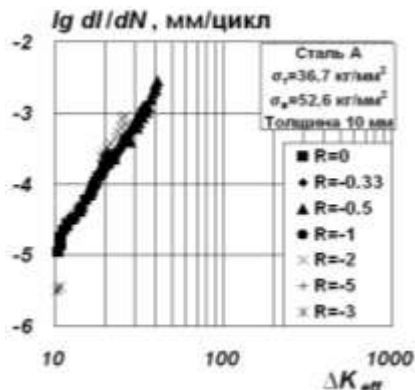
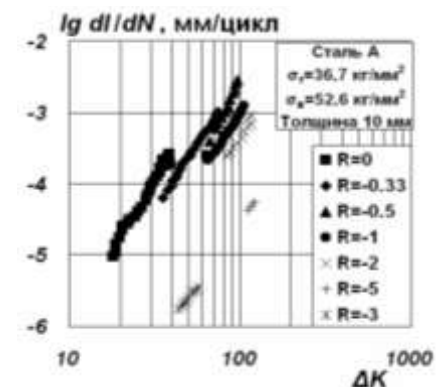
Таким образом, в рамках единой физической концепции РУТ с позиции взаимодействия остаточных сжимающих напряжений перед фронтом трещины с напряжениями от внешней нагрузки объяснено влияние величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на кинетику РУТ.

Достоверность предложенной модели РУТ подтверждается результатами обработки экспериментальных данных, полученных при испытаниях в исследованиях Като, Курихары, Салливана и Крукера (рисунки 5-6), а также сравнением экспериментальных и расчетных кривых длины усталостных трещин от количества приложенных циклов нагружения с расчетом (рисунки 7-9).

В четвертой главе приведена методика расчета усталостной долговечности элементов металлоконструкций.

Функции распределения долговечности и надежности вычисляются методом статистического моделирования. Реальный эксплуатационный процесс нагружения заменяют блочным. Функции распределения двух случайных величин – амплитуды σ_a и среднего напряжения цикла σ_m (полученных одним из методов по ГОСТ 25.101. – 83) заменяют ступенчатой линией, представляющей в графической форме блок нагружения и определяют число циклов нагружения $(\sigma_{ai} + \sigma_{mi})$, соответствующее i - ой ступени.

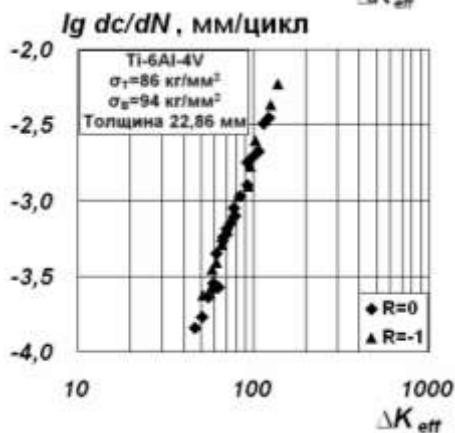
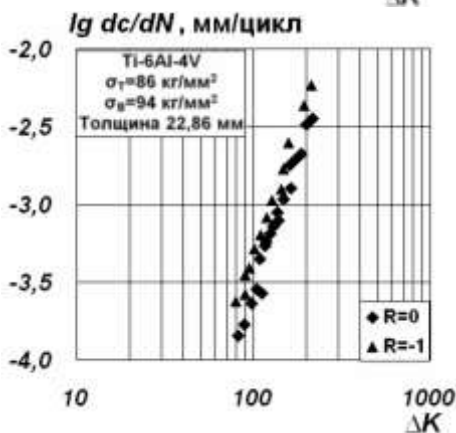
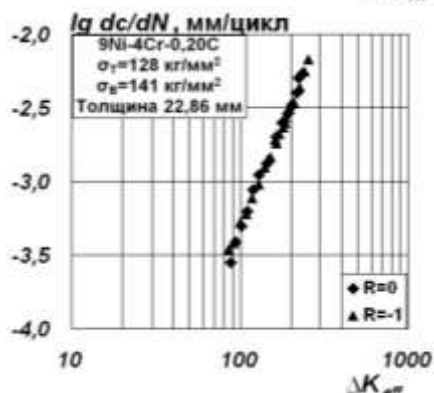
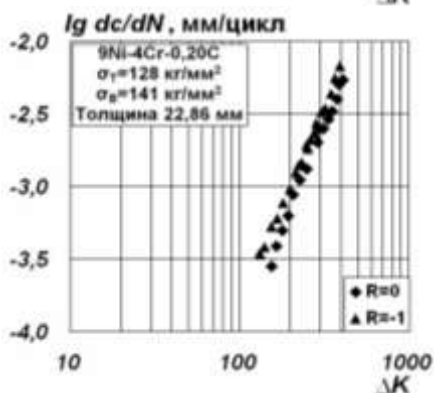
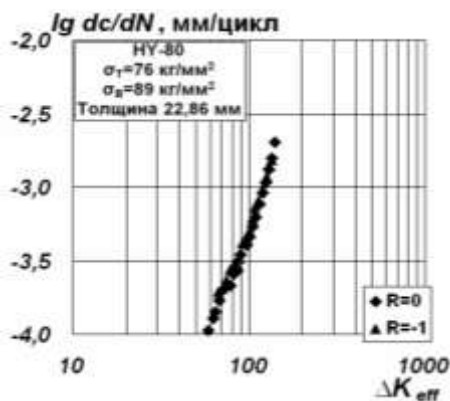
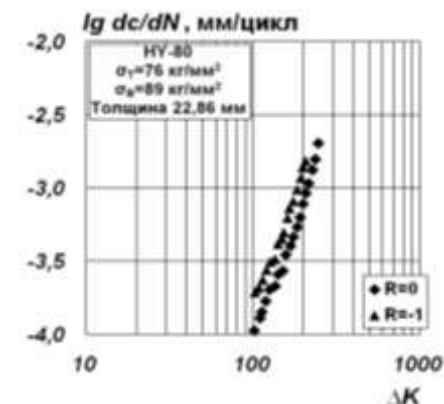
Предлагаемая методика расчета реализована в виде программы «Прогноз+», блок-схема которой приведена на рисунке 10.



а)

б)

Рисунок 5 – Диаграммы усталостного разрушения, построенные по результатам обработки экспериментальных данных Като, Курихары и Крукера с использованием уравнения Пэриса (а) и предлагаемой зависимости (б) для сквозной трещины



а)

б)

Рисунок 6 – Диаграммы усталостного разрушения, построенные по результатам обработки экспериментальных данных Като, Курихары и Крукера с использованием уравнения Пэриса (а) и предлагаемой зависимости (б) для поверхностной трещины

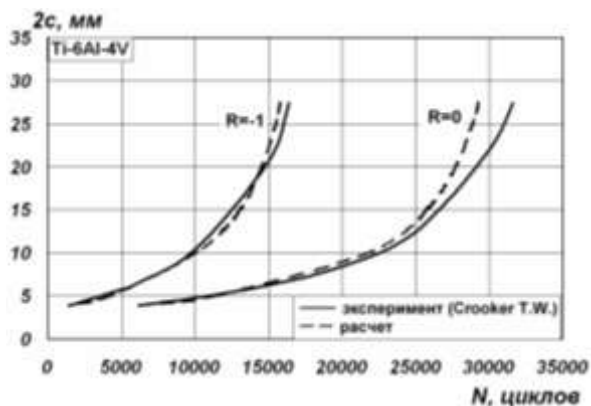


Рисунок 7 – Зависимости длины усталостной трещины от количества приложенных циклов нагружения при $R=0$ и при $R=-1$ для сплава Ti-6Al-4V

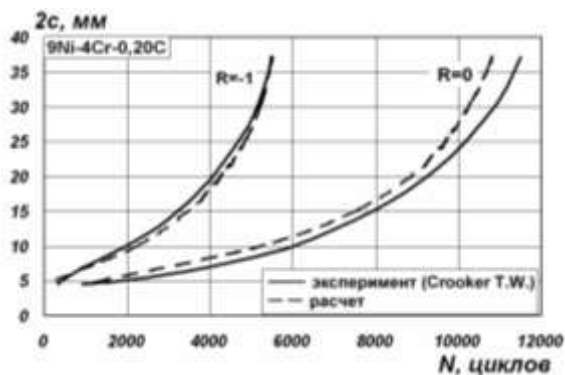


Рисунок 8 – Зависимости длины усталостной трещины от количества приложенных циклов нагружения при $R=0$ и при $R=-1$ для стали 9Ni-4Cr-0,20C

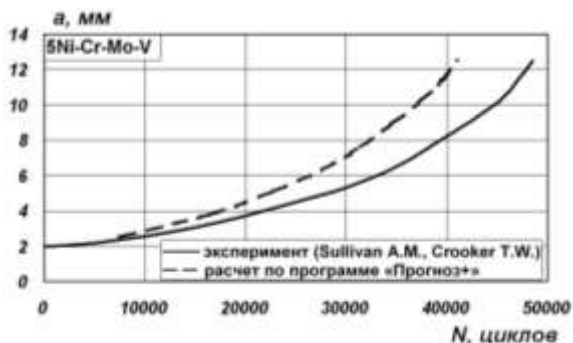


Рисунок 9 – Зависимости длины усталостной трещины от количества приложенных циклов нагружения для стали 5Ni-Cr-Mo-V при блочном нагружении

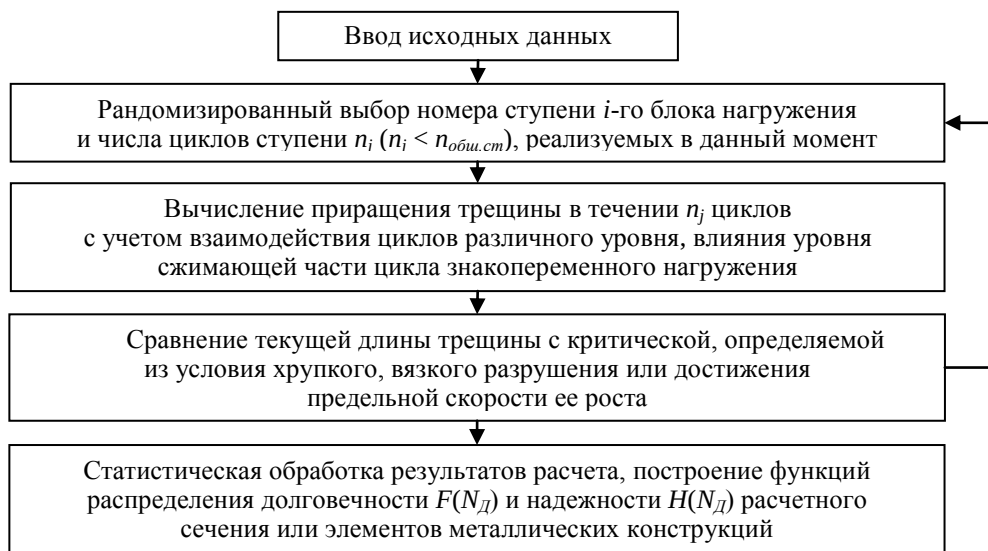


Рисунок 10 – Блок-схема программы «Прогноз+»

В качестве примера были выполнены расчеты остаточного ресурса металлической дымовой трубы высотой 82 м по линейной и нелинейной (с учетом взаимодействия циклов различного уровня) гипотезам накопления повреждений.

Остаточный ресурс дымовой трубы, рассчитанный по линейной гипотезе накопления повреждений превышает в 1,6 раза остаточный ресурс, рассчитанный по нелинейной гипотезе, что хорошо коррелирует с данными исследований В.П. Когаева.

На рисунке 11 приведены функции распределения остаточного ресурса и надежности сечения в месте обрыва вертикального ребра жесткости дымовой трубы.

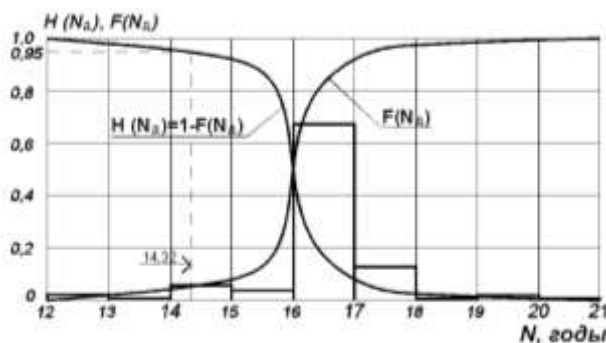


Рисунок 11 - Графики статической функции распределения остаточного ресурса $F(N_d)$ и функции надежности $H(N_d)$ расчетного сечения дымовой трубы

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Изучены закономерности перераспределения напряжений в окрестности вершины трещины при знакопеременном нагружении. Установлено:

- в процессе снижения внешней растягивающей нагрузки при относительной величине текущей нагрузки $P^{тек}/P_{max}=0,63\dots 0,82$ в окрестности вершины трещины формируются остаточные сжимающие напряжения; при этом протекают два противоположных процесса – рост остаточных сжимающих напряжений по мере снижения нагрузки и снижение остаточных сжимающих напряжений вследствие перераспределения напряжений из-за протекания циклических пластических деформаций сжатия;

- при приложении сжимающей части цикла берега трещины смыкаются (с этого момента трещина перестает быть концентратором напряжений) и передают силовой поток; данный этап сопровождается дальнейшим протеканием циклических пластических деформаций сжатия в окрестности вершины трещины, уменьшением величины и протяженности остаточных сжимающих напряжений.

2. Исследованы закономерности протекания пластических деформаций в окрестности вершины трещины. Предложено выражение для определения размера зоны циклических пластических деформаций при знакопеременном нагружении в направлении продвижения трещины, позволяющее учитывать влияние уровня сжимающей части цикла нагружения. Данная зависимость инвариантна к марке стали и величине максимального коэффициента интенсивности напряжений.

3. Развитие циклических пластических деформаций материала в вершине трещины при значении $\Delta K_{\sigma\delta}/S_T \sqrt{1-i-i} < 2,3$ не приводит к увеличению величин размахов и максимальных значений коэффициента интенсивности напряжений по сравнению с упругим случаем, что позволяет использовать уравнения линейной упругой механики разрушения для их вычислений.

4. Установлено, что для циклически стабильных сталей при толщине металлопроката до 25 мм отношение величины остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в вершине трещины в полуциклах разгрузки, к размаху напряжений за растягивающую часть цикла нагружения, инвариантно к марке стали, толщине металлопроката, величине максимального коэффициента интенсивности напряжений и зависит только от величины коэффициента асимметрии цикла нагружения.

5. С позиции взаимодействия остаточных напряжений, формирующихся в окрестности вершины трещины в процессе разгрузки, с напряжениями от внешней нагрузки объяснено влияние сжимающей части цикла нагруже-

ния на рост усталостных трещин. Предложено использовать в уравнении Пэриса вместо номинального размаха коэффициента интенсивности напряжений эффективную величину номинального размаха коэффициента интенсивности напряжений за растягивающую часть цикла нагружения.

6. Разработана модель определения эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{eff} , позволяющая учитывать влияние величины сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на изменение скорости роста трещины. Применение предложенной модели при обработке экспериментальных данных позволило получить параметры сопротивления материала развитию трещины, не зависящие от параметров внешней нагрузки.

7. Для конструкций, воспринимающих циклические воздействия, усовершенствована методика расчета функций распределения долговечностей и надежности элементов сооружений, в сечениях которых возможно наличие исходных технологических дефектов и макротрещин, период подрастания которых до критических размеров определяет срок службы конструкции; определение функции надежности выполняется методом статистического моделирования с использованием модели роста усталостной трещины, учитывающей влияние сжимающей части цикла знакопеременного циклического нагружения.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Емельянов О.В., Зимонин Е.А. Калинин К.Г. Феноменологическая модель роста усталостной трещины при стабильном гармоническом знакопеременном нагружении // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: IV Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза. – 2005. – С. 193 – 195.

2. Емельянов О.В., Зимонин Е.А. Исследование напряженно-деформированного состояния в вершине трещины при знакопеременном циклическом нагружении // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: VI Междунар. науч.-техн. конф.- Пенза – 2007. – С. 106 – 109.

3. Емельянов О.В., Зимонин Е.А. Параметры сопротивления развитию трещины при знакопеременном циклическом нагружении // Инновационные технологии и повышение надежности и долговечности строительных конструкций: Сб. науч. Тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 85-летию со дня рождения проф.а П.П. Ступаченко. – Владивосток – 2007. – С. 113-117.

4. Зимонин Е.А. Модель роста усталостной трещины при знакопеременном циклическом нагружении // Строительство и образование: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ – 2007. – С. 47 – 49.

5. Зимонин Е.А. Оценка надежности, долговечности и остаточного ресурса элементов металлоконструкций при знакопеременном циклическом нагружении // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: Сб. реф. науч.-иссл. работ аспирантов. – Челябинск, ЮУрГУ – 2007.– С. 98-99.

6. Емельянов О.В. Зимонин Е.А. Изучение влияния сжимающей части знакопеременного циклического нагружения на рост усталостных трещин // Промышленное и гражданское строительство. 2009. – №7. – С. 29-30.

7. Зимонин Е.А. Упругопластический анализ НДС в окрестности вершины трещины при знакопеременном циклическом нагружении // Сб. науч. тр. 67 науч.-техн. конф., посвященной 75-летию со дня образования МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск – 2009.

8. Емельянов О.В. Зимонин Е.А. Исследование закономерностей формирования остаточных сжимающих напряжений в окрестности вершины трещины при знакопеременном циклическом нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2010. – №3. – С. 25-27.

Зимонин Евгений Александрович

**ВЛИЯНИЕ СЖИМАЮЩЕЙ ЧАСТИ ЦИКЛА
ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО НАГРУЖЕНИЯ
НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Специальность 05.23.01 – «Строительные конструкции, здания
и сооружения»**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Издательство Магнитогорского государственного технического университета
им. Г.И. Носова**
