

01.02.06
К 893

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ
ОБРАЗОВАНИЮ

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи
УДК 539.4:620.1

Кузьмин Вадим Романович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ**

*Специальность 01.02.06. - «Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры»*

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск - 1990

Работа выполнена в Якутском ордена Дружбы народов
Государственном университете

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	О.В.Соснин
член-корреспондент АН СССР, доктор технических наук, профессор	Ю.С.Уржумцев
доктор технических наук, профессор	О.Ф.Чернявский

Ведущее предприятие - Центральный научно-исследовательский
институт тяжелого машиностроения

Защита состоится "31" октября 1990г., в 15 часов,
на заседании специализированного совета Д.053.13.01 при
Челябинском политехническом институте имени Ленинского
комсомола по адресу: 454080, проспект им.В.И.Ленина, 76,
в ауд.244.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
института.

Автореферат разослан "25" сентября 1990 года

Ученый секретарь
специализированного совета  В.М.Кононов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Качество, надежность и работоспособность современной техники в регионах с низкими климатическими температурами характеризуют следующие показатели: поток отказов ряда деталей и узлов машин и металлоконструкций увеличивается здесь в 2...3 раза; наработка на отказ уменьшается в 3 и более раз; фактический срок службы сокращается по сравнению с нормативным в 2...3 раза; ежегодные потери от непригодности техники к эксплуатации при низких температурах достигают 10...15 млрд рублей. Представленные данные показывают, что северная техника проектируется без должного учета отрицательного воздействия низких температур на прочность и надежность конструкций. В документации на изделия отсутствуют сведения, необходимые для организации их эксплуатации по техническому состоянию в зимний период, такие, как изменение фактических запасов прочности, ресурса, вероятности безотказной работы при понижении температуры. Их наличие позволяет разработать стратегию технической эксплуатации, обеспечивающую работу машины с максимально возможной прибылью при минимальных затратах.

Рассматриваемые характеристики можно определить по результатам изучения статистики отказов деталей и узлов машин в зависимости от наработки в суровых природно-климатических условиях. Данный подход широко распространен в инженерной практике. Однако такой способ является пассивным и предполагает проведение длительных, трудоемких испытаний и наблюдений, что связано со значительными затратами средств и времени. Поэтому важное значение приобретают расчетные методы построения на стадии проектирования температурных зависимостей показателей прочности и надежности конструкций. В результате возможно сравнение различных вариантов проектируемой конструкции по критериям хладостойкости, существенное снижение металлоемкостей машин "северного" исполнения, повышение их надежности, ускорение внедрения в производство новой высокоэффективной техники и научно обоснованных норм эксплуатации конструкции. Именно этим определяется актуальность данной работы.

В основу диссертации положены результаты исследований по программе "Алмазы Якутии" (Постановление ГНТ № 239 от 31.05.83,

п.5.15. Решение АН СССР № 10103-1128 от 21.07.83 г. Тема:

1.10.2.8. Конструкционная прочность и разрушение. Исследование несущей способности деталей машин и сварных металлоконструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях Крайнего Севера), а также комплексной научно-технической программе Минвуза РСФСР "Надежность конструкций" (Приказ Минвуза РСФСР № 659 от 13.11.81. Тема : Повышение надежности и долговечности горнообогатительного оборудования), проведенных автором в Институте физико-технических проблем Севера Якутского Научного Центра СО АН СССР и в Якутском государственном университете.

Целью настоящей работы были исследование и разработка расчетных методов оценки усталостной долговечности деталей и элементов в связи с вопросами прогнозирования их хладостойкости и создание на базе этих методов системы расчетов на хладостойкость.

Основные задачи исследования. Выполненные обобщения, теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать научные основы для расчетной оценки и прогнозирования хладостойкости деталей и элементов, исчерпание несущей способности которых при низких температурах - следствие постепенного накопления усталостных повреждений в зонах повышенной напряженности и распространения магистральных трещин и третинообразных дефектов при циклическом нагружении, а также решить ряд принципиально важных как в научно-методическом и теоретическом, так и практическом отношении задач, которыми являются:

1. Исследование влияния низких температур и повторно-переменных нагружений высокого уровня на напряженно-деформированное состояние (НДС) в зонах концентрации напряжений.

2. Разработка применительно к области мало-и многоциклового нагружения метода оценки долговечности элементов по критерию образования усталостной трещины, позволяющего расчетным путем без дополнительных эмпирических коэффициентов на основе инвариантных к геометрии концентратора зависимостей учитывать изменение интенсивности процессов накопления повреждений в неоднородном поле напряжений при изменении соотношений между размахами упругой, пластической и полной деформациями.

3. Разработка аналитического способа вероятностного анализа процесса усталостного разрушения, который основан на представлении стохастических функций, описывающих процесс накопле-

ния повреждений в зонах повышенной напряженности и распространения магистральной трещины, в виде канонических разложений по некоррелированным случайным величинам.

4. Разработка системы расчетной оценки хладостойкости деталей и элементов, которая основана на использовании количественных показателей, характеризующих изменения надежности изделия (запаса прочности, ресурса, вероятности разрушения) при понижении температуры.

5. Исследование влияния на хладостойкость факторов, ограничивающих несущую способность элементов при низких температурах эксплуатации.

Научная новизна работы: 1. Сформулированы принципиальные требования и положения системы расчетов деталей и элементов на хладостойкость (виды предельных состояний и факторы, ограничивающие несущую способность и долговечность объектов при низких температурах; комплексные показатели хладостойкости; методы их расчета; методика технико-экономического анализа показателей). 2. Установлено, что при снижении температуры изменяется характер распределения напряжений в окрестностях концентратора. Существенно возрастают составляющие σ_x , σ_z , σ_θ (x - продольная ось). Максимум напряжений σ_x смещается из глубины зоны пластической деформации к вершине надреза. Коэффициент концентрации напряжений в упругопластической области при снижении температуры от 293 до 200 К увеличивается на 10...40%, при понижении до 77 К - на 20...50% и более. Установлены закономерности кинетики напряженно-деформированного состояния в зонах концентрации напряжений при повторно-переменных нагружениях высокого уровня, получены соотношения для их учета. 3. Разработана модель накопления усталостных повреждений, которая позволяет расчетным путем без дополнительных эмпирических коэффициентов на основе инвариантных к геометрии концентратора соотношений - а) универсального критериального уравнения; б) зависимостей для расчета эффективных напряжений и деформаций в зонах концентрации при упругопластическом деформировании металла - прогнозировать долговечность элементов по критерию образования усталостной трещины при $T = 293$ К и низких температурах в широком диапазоне циклов нагружения $N = 10^2 \dots 10^6$. 4. Построены канонические разложения стохастических функций, описывающих процессы накопления усталостных повреждений в зо-

нах повышенной напряженности и распространения магистральных трещин при циклическом нагружении. Установлена возможность их использования для вероятностной оценки долговечности элементов по критериям усталостной прочности. 5. Установлены закономерности, и получены количественные оценки влияния роста концентрации напряжений, уменьшения пластичности металлов, циклических перегрузок высокого уровня, изменения характеристик кинетической диаграммы усталостного разрушения при снижении температуры на хладостойкость элементов. Показано, что в переходной области от мало-к многоциклового усталости понижение температуры, как правило, сопровождается уменьшением фактических запасов прочности, снижением ресурса, возрастанием вероятности разрушения элементов. Установлено, что оценка хладостойкости элементов с трещинами по осредненным показателям неправомерна. Необходимо определять их хладостойкость при требуемом уровне надежности.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Полученные результаты явились научной основой для создания системы расчетов на хладостойкость широкого класса деталей и элементов, воспринимающих в период эксплуатации циклические воздействия. Разработаны и внедрены в производство рекомендации по повышению надежности технологического оборудования горнодобывающей промышленности Севера и получен экономический эффект 570,475 тыс.руб. Результаты выполненных исследований составили основу методических рекомендаций "Прогнозирование хладостойкости деталей машин и элементов конструкций", а также внедрены в учебный процесс.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Разрушение металлов и сварных конструкций при низких температурах" (Якутск, 1978), III Всесоюзном симпозиуме "Малоцикловая усталость элементов конструкций" (Паланга, 1979), первой (1979) и второй (1981) научно-технических конференциях "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов" (Калининград), Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение долговечности и надежности машин и приборов" (Куйбышев, 1981), VIII Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (Пермь, 1983), Уральской зональной конференции "Пути повышения надежности и ресурса систем машин" (Свердловск, 1983), Всесоюзной научно-технической конференции

"Надежность и долговечность машин и приборов" (Куйбышев, 1984), краевой конференции "Применение методов механики разрушения в расчете строительных металлических конструкций на хрупкую прочность и долговечность" (Красноярск, 1984), совещании рабочей группы при Научном Совете ГКНТ СССР "Конструкционная прочность и разрушение" (Ленинград, 1984), выездном заседании Научных Советов ГКНТ СССР "Машины и материалы, отвечающие требованиям эксплуатации в различных климатических условиях страны" и "Конструкционная прочность и разрушение" (Якутск, 1984), совещании "Разрушение металлов и конструкций при низких температурах" (Ленинград, 1985), Всесоюзной конференции "Развитие производительных сил Сибири и задачи ускорения научно-технического прогресса" (Якутск, 1985), научно-технической конференции "Методы оценки и пути повышения трещиностойкости и надежности труб, трубопроводов и сосудов давления" (Челябинск, 1985), II Всесоюзном симпозиуме по механике разрушения (Житомир, 1985), V Всесоюзном симпозиуме "Малоцикловая усталость - критерии разрушения и структура материалов" (Волгоград, 1987), на ежегодных конференциях профессорско-преподавательского состава Якутского госуниверситета (1979-1988).

Публикации. По теме диссертации опубликованы монография, учебное пособие, 34 научных статьи и сообщения.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы из 331 наименования и приложения. Работа изложена на 209 страницах основного текста, содержит 73 рисунка и 34 таблицы.

В первой главе обобщены результаты исследования служебных свойств конструкционных металлов и данные о надежности и работоспособности техники на Севере. Показаны виды предельных состояний, и установлены факторы, ограничивающие хладостойкость несущих конструкций. Обоснованы цель и задачи исследования.

Во второй главе описаны методики, и приведены результаты исследования влияния низких температур и повторно-переменных нагрузений высокого уровня на НДС в зонах концентрации напряжений.

Третья глава посвящена разработке метода оценки долговечности элементов по критерию образования усталостной трещины, позволяющего расчетным путем без дополнительных эмпирических

коэффициентов на основе предложенной модели накопления усталостных повреждений в неоднородном поле деформаций прогнозировать долговечность элементов при $T = 293 \text{ K}$ и низких температурах в широком диапазоне циклов нагружения $N = 10^2 \dots 10^6$. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенного метода расчета долговечности элементов.

В четвертой главе описан способ вероятностного анализа процесса усталостного разрушения, основанный на представлении стохастических функций в виде канонических разложений по некоррелированным случайным величинам. Получены соотношения для расчета вероятности образования усталостной трещины в N -ном цикле и вероятности окончательного разрушения элемента после N циклов нагружения. Описана методика расчета числа циклов задержки в развитии усталостной трещины после перегрузки. Приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

В пятой главе приведены данные об апробации разработанных методов расчета. Представлены результаты исследования надежности стальных бункеров горнодобывающей промышленности Севера по критериям усталостной прочности и рекомендации по повышению их надежности.

В шестой главе сформулированы принципиальные требования и положения систем расчетов деталей и элементов на хладостойкость. Изложены результаты исследования хладостойкости ряда деталей и элементов при циклическом нагружении.

В приложении даны документы о внедрении результатов диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Проблема оценки хладостойкости конструкций. Анализ работ В.И.Ларионова, Р.С.Григорьева, Ю.С.Уржумцева, А.В.Сильвестрова, Д.Е.Махно, П.И.Коха, М.Н.Георгиева, В.Г.Кудинова, А.М.Ишкова, К.В.Попова, В.В.Филиппова и др., а также данные статистических и повторно-статистических испытаний крупногабаритных сосудов из сталей 14Х2ГМР, 12ХМ, 10Х2ГМ, проведенных при участии автора в условиях низких температур, показывают, что неблагоприятные воздействия климатических факторов изменяют свойства конструкционных материалов и существенно ухудшают надежность и работоспособность машин и конструкций.

Проанализированы исследования по изучению прочности, пластичности и трещиностойкости металлов при низких температурах (работы Г.В.Ужика, Е.М.Шевандина, Н.Н.Давиденкова, Я.Б.Фридмана, Г.С.Писаренко, Н.А.Махутова, В.Т.Троценко, А.А.Лебедева, В.А.Стрижало, Н.В.Новикова, П.Ф.Коселова, Е.Г.Макарова, Д.А.Вигли и др.). Показано, что в результате повышения сопротивления металлов начальной пластической деформации понижение температуры должно сопровождаться существенным ростом концентрации напряжений при упругопластическом деформировании элементов. Из анализа типичных кривых скорости распространения трещин в сталях видно, что в области небольших скоростей понижение температуры приводит к уменьшению скорости развития трещины, а в области более высокой скорости, наоборот, - к увеличению. Следовательно, при низких температурах стадия докритического развития усталостной трещины, определенная при 50% вероятности разрушения, может быть более длительной, чем при температуре $T_0 = 293$ К. В то же время вследствие снижения трещиностойкости материала возрастает вероятность разрушения элементов. Поэтому заданный уровень надежности конструкции в условиях низких температур и $T_0 = 293$ К обеспечивается лишь при различных значениях исходных запасов по прочности и долговечности, а использование 50% ресурса в качестве показателя при оценке влияния низких температур на долговечность объектов может привести к неверному выводу.

В результате изучения служебных свойств конструкционных металлов, особенностей деформирования и разрушения элементов в диапазоне низких климатических температур, а также обобщения данных о прочности и надежности техники на Севере показано, что уровень хладостойкости несущих конструкций ограничивается предельными состояниями по усталости металлов и хрупкими (квазихрупкими) разрушениями.

Снижение усталостной прочности деталей и элементов при низких климатических температурах вызвано:

- превышением нагруженности элементов расчетного уровня вследствие частичных и полных отказов демпфирующих систем, температурных напряжений и т.п.;
- ростом концентрации напряжений вследствие повышения сопротивления металлов начальной пластической деформации;
- более существенным, чем при температуре $T_0 = 293$ К, сниже-

нием исходного предела выносливости элементов в результате повреждающего действия циклических перегрузок высокого уровня;

- снижением ресурса пластичности;
- повышением вероятности разрушения элементов на стадии докритического развития трещины.

Уменьшение трещиностойкости материала при понижении температуры является причиной квазихрупких и хрупких разрушений.

Указанные факторы оказывают влияние на уровень максимальных напряжений и интенсивность процессов накопления повреждений в зонах концентрации напряжений, а также на время докритического развития усталостной трещины. Это приводит к тому, что в условиях значительных перегрузок понижение температуры, как правило, сопровождается уменьшением разрушающих напряжений. В результате изменяются фактические запасы прочности, снижается ресурс, возрастает риск отказа конструкции.

Установлено, что в общем случае оценивать и прогнозировать хладостойкость элементов традиционными методами, используя лишь результаты исследования их способности сопротивляться возникновению хрупких разрушений, невозможно. Основой для прогнозирования хладостойкости несущих элементов должны быть данные изучения возможных процессов реализации исходной надежности объекта при базовой $T_0 = 293 \text{ K}$ и низкой температурах.

Анализ работ С.В.Серенсена, Н.А.Махутова, В.Т.Трощенко, В.П.Когаева, Р.М.Шнейдеровича, В.В.Панасюка, Г.С.Писаренко, В.В.Болотина, И.А.Биргера, Г.П.Черепанова, А.Е.Андрейкива, Е.М.Морозова, А.Я.Красовского, Л.А.Копельмана, В.А.Винокурова, Г.П.Карзова, А.С.Гусева, А.Б.Злочевского, В.В.Ларионова, А.Н.Романова, В.М.Панферова, А.Н.Грубина, Р.Р.Мавлютова, Г.Н.Савина, Г.В.Ужика, С.Я.Яремы, В.С.Лукинського, Г.Нейбера, С.Мэнсона, Б.Ф.Лангера, Я.К.Немец, Т.Робертсона, Д.Ирвина, А.Уэльса и др. показал следующее. В элементах при эксплуатационных нагрузках пластические деформации невелики и возникают лишь в окрестностях концентраторов напряжений. В этих случаях эффективны приближенные методы расчета полей упругопластических деформаций и напряжений в зонах повышенной напряженности. Однако в замкнутом виде общие выражения для составляющих напряжения и деформации не получены. Отсутствуют данные, характеризующие влияние низких температур на концентрацию напряжений. Имеются лишь отдельные исследования НДС в зонах концентрации на-

пряжений при циклическом упругопластическом деформировании. В основу расчетных методов оценки долговечности элементов в области ограниченной выносливости по критерию образования усталостной трещины положены зависимости, которые, как показывают эксперименты, не инвариантны к геометрии концентратора. Установлено, что если определять характеристики, входящие в критериальные уравнения по результатам испытаний гладких образцов, а затем использовать их для оценки долговечности элементов с концентраторами напряжений, то возможно значительное несоответствие расчетных и экспериментальных долговечностей.

Для анализа стохастического процесса усталостного разрушения элементов созданы эффективные вероятностные модели. Их численная реализация осуществляется методом статистических испытаний. При увеличении стохастических элементов, входящих в модели; резко возрастает объем необходимых вычислений, что ограничивает возможность этих методов и затрудняет их использование в инженерной практике.

Отмеченные особенности и определили круг вопросов, рассмотренных в работе.

2. Концентрация напряжений и деформаций в элементах при однократном и циклическом упругопластическом деформировании. Рост сопротивления начальной пластической деформации металлов при понижении температуры приводит к повышению концентрации напряжений. Поэтому для оценки хладостойкости элементов необходимо исследовать развитие упругопластических деформаций в зонах повышенной напряженности. Разработана инженерная методика расчета НДС в зонах концентрации напряжений при упругопластическом деформировании, согласно которой общее решение рассматриваемой задачи записано через функции, характеризующие распределение напряжений (деформаций) в упругом материале. При создании методики использовалась известная кинематическая гипотеза о инвариантности закона изменения составляющих деформации в упругой и пластической областях и алгоритм метода "упругих" решений. В соответствии с методикой компоненты деформаций $\tilde{\epsilon}_{nm} = \epsilon_{nm} / \epsilon_T$ определяются по формуле

$$\tilde{\epsilon}_{nm} = \frac{3}{2} \tilde{\sigma}'_n (f_{nm} - \delta_{nm} f). \quad (I)$$

Выражения для расчета напряжений $\tilde{\sigma}_{nm} = \sigma_{nm} \sigma_T$ следующие:

- при линейном упрочнении

$$\tilde{\sigma}_{nm} = (1 - \tilde{E}_T)(f_{nm} - \delta_{nm} f) / f_i^e - \tilde{\sigma}'_n [\delta_{nm} f^* - \tilde{E}_T (f_{nm} - \delta_{nm} f)]; \quad (2)$$

- при степенном упрочнении

$$\tilde{\sigma}_{nm} = (\tilde{\sigma}'_n)^n (f_i^e)^{n-1} (f_{nm} - \delta_{nm} f) + \delta_{nm} f^* \tilde{\sigma}'_n. \quad (3)$$

Здесь $f_{nm} = \sigma_{nm}^* / \sigma_n$; $f = \sigma^* / \sigma_n$; $f_i^e = e_i^* / e_n$ - известные функции, характеризующие распределение напряжений $\tilde{\sigma}_{nm}^*$, средних напряжений σ^* и интенсивности деформаций e_i^* в сечении элемента при его упругом деформировании и $\nu = 0,5$ ($\tilde{\sigma}'_n$ - номинальное напряжение, ν - коэффициент Пуассона; e_n - номинальная деформация); $\tilde{E}_T = E_T / E$ - модуль линейного упрочнения; E - модуль упругости; δ_{nm} - символ Кронекера; n - показатель степенного упрочнения материала; f^* - функция, характеризующая распределение средних напряжений по сечению элемента при упруго-пластическом деформировании. Номинальные напряжения $\tilde{\sigma}'_n = \sigma'_n / \sigma_T$ вычисляются при измененных внешних силах P , отличающихся от заданных на величину добавки ΔP . Эти добавки находятся из условия равновесия. Выражения для функций f_{nm} , f , f_i^e определяются из решения соответствующих линейных задач. Полученные формулы применимы для расчета \tilde{e}_{nm} и $\tilde{\sigma}_{nm}$ в ослабленном поперечном сечении детали при упругом номинальном напряженном состоянии, когда максимальные пластические деформации не превышают 5...6 величин деформации, соответствующей σ_T .

Проведено сопоставление результатов расчета НДС пластины с круговым отверстием по предложенному способу и методом конечных элементов ($n = 0,15$ и $0,2$). Результаты расчета напряженного состояния пластины двумя методами при $\tilde{\sigma}'_n \leq 0,875$ практически совпадают (расхождение не превышает 2...4%). Точность расчета деформаций в окрестностях отверстия зависит от уровня номинальных напряжений. При $\tilde{\sigma}'_n \leq 0,6$ расхождение результатов расчета e_i^{\max} незначительно. При $\tilde{\sigma}'_n = 0,875$ различие в полученных значениях e_i^{\max} достигает 20%.

Для исследования влияния низких температур на концентрацию напряжений проведены расчеты напряженного состояния элементов (пластины с боковыми надрезами и круговым отверстием в условиях обобщенной плоской деформации; стержень с кольцевой выточкой). Расчеты осуществлялись при $T = 293, 200$ и $77K$:

теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 1,20 \dots 5,1$; $\tilde{\sigma}_H = 0,3 \dots 0,8$. Металлы, выбранные для исследования (стали 12Х18Н10Т, 30ХГСА, 30, 45, 19Г, сплав Д20 и АТ-2), сохраняют достаточно большой запас пластичности при статическом нагружении в условиях весьма значительного снижения температуры. Однако изменения сопротивления металлов начальной пластической деформации в диапазоне T от 293 до 77 у них различно. Существенное повышение предела текучести $\sigma_{0,2}$ при понижении температуры наблюдается для сталей 12Х18Н10Т, 19Г, 30, 45 и сплава АТ-2. В отличие от этих металлов сталь 30ХГСА и сплав Д20 обладают малой чувствительностью к изменению $\sigma_{0,2}$.

Анализ полученных данных показывает, что в результате повышения сопротивления металла начальной пластической деформации при понижении температуры изменяется характер распределения напряжений в окрестностях концентратора. Существенно возрастают составляющие σ_x , σ_z , σ_y . Максимум напряжений σ_x смещается из глубины зоны пластической деформации к вершине надреза. Значения коэффициента концентрации напряжений в упругопластической области K_σ при снижении температуры от 293 до 200 К увеличились для стали 12Х18Н10Т на 25...30%; сталей 30, 19Г и сплава АТ-2 - на 12...17%, стали 45 - на 40...50%. Понижение T до 77 К вызывает более существенный рост K_σ (для стали 12Х18Н10Т до 40%; сталей 30, 45, 19Г - в 1,5 и более раз). Изменения K_σ в исследуемом диапазоне температур (293...77 К) для стали 30ХГСА и сплава Д20 незначительны.

В работе изучены процессы кинетики НДС в зонах концентрации напряжений при циклическом упругопластическом деформировании. Для этой цели в координатах S_i и ε_i^* с началом координат в точке, соответствующей началу разгрузки, для каждого полуцикла нагружения k определялись напряжения $S_{nm}^{(k)}$ и деформации $\varepsilon_{nm}^{(k)}$. В качестве диаграммы деформирования материала использовалась обобщенная диаграмма циклического деформирования Р.М.Шнейдеровича и А.П.Гусенкова. Выявлен ряд закономерностей циклического деформирования металлов в зонах концентраций напряжений при упругом номинальном напряженном состоянии, из которых необходимо отметить следующие:

- процесс кинетики максимальных напряжений, вызванный циклическим упрочнением металла, близок к жесткому и может быть

описан в полулогарифмических координатах линейной аппроксимирующей зависимостью

$$\sigma_{\max}(N) = \sigma_{\max}^1 + d \lg N; \quad (4)$$

- снижение максимальных напряжений в элементах из циклически разупрочняющихся материалов происходит в течение 30..50 полуциклов, и уровень σ_i^{\max} приближается к величине σ_T .

3. Метод расчета долговечности элементов по критерию образования усталостной трещины при циклическом упругопластическом деформировании. При снижении температуры возрастает концентрация напряжений, изменяются соотношения между размахами упругой $\Delta \epsilon_y$, пластической $\Delta \epsilon_p$ и полной $\Delta \epsilon$ деформации, а следовательно, и усталостные повреждения материала. Это приводит к повышению чувствительности металлов к действию концентрации напряжений. Установлено, что если размахи составляющих полной деформации $\Delta \epsilon_y$ и $\Delta \epsilon_p$ - соизмеримые величины, то использование известных уравнений Б.Лангера и С.Мэнсона для оценки долговечности элементов N_r приводит к существенному отклонению расчетных значений N_r от экспериментальных. В связи с изложенным запишем деформационно-кинетический критерий усталостного разрушения в виде

$$P_y + P_p + P_s = 1, \quad (5)$$

где P_y , P_p - соответственно доля повреждений от упругой и пластической составляющих полной деформации; P_s - доля квазистатических повреждений. Повреждения P_y вызваны местными неупругими сдвигами, межзатомным внутренним трением, дефектом модуля упругости и другими необратимыми процессами, не связанными с макропластическими деформациями. Их интенсивность определяется амплитудой действующих напряжений и пределом выносливости материала. Интенсивность повреждений P_p определяется размахом пластической деформации и располагаемой пластичностью материала.

Представляя полную деформацию - как сумму упругой и пластической

$$\epsilon_{ia} = 2(1+\nu)\sigma_{ia}/(3E) + \epsilon_{ap} \quad (6)$$

и принимая во внимание известные связи долговечности N_f с амплитудами составляющих полной деформации

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ap} &= -0,25 \ln(1-\Psi) N_f^{-m}; \\ \varepsilon_{ay} &= 2(1+\nu) \sigma_{-1} N_0^{\mu} N_f^{-\mu} / (3E), \end{aligned} \quad (7)$$

раздельно определяются усталостные повреждения от каждой составляющей. Разрушающее число циклов находится по правилу линейного суммирования усталостных повреждений из условия достижения суммой повреждений предельной величины. Если доля квазистатических повреждений Π_s мала и ими можно пренебречь, то критериальное уравнение примет вид

$$\int_1^{N_f} \left[\frac{\varepsilon_{ap}}{-0,25 \ln(1-\Psi)} \right]^{\frac{1}{m}} dN + \int_1^{N_f} \left[\frac{\sigma_{ia}}{\sigma_{-1} N_0^{\mu}} \right]^{\frac{1}{\mu}} dN = 1. \quad (8)$$

Здесь m, μ - постоянные материала; σ_{-1} - предел выносливости при базовом числе циклов N_0 ; Ψ - относительное сужение в шейке образца. Используя обобщенную диаграмму циклического деформирования Р.М.Шнейдеровича и В.П.Гусенкова, из выражения (8) получены уравнения кривой усталости при жестком ($\varepsilon_{ia} = \text{const}$) и мягком ($\sigma_{ia} = \text{const}$) нагружениях:

- жесткое нагружение

$$K_1 \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_{ia} \varepsilon_T}{-0,25 \ln(1-\Psi)} \right]^{\frac{1}{m}} + K_2 \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_{ia}}{\sigma_{-1} N_0^{\mu}} \right]^{\frac{1}{\mu}} = N_f^{-1}; \quad (9)$$

- мягкое нагружение

$$K_3 \left[\frac{\tilde{\sigma}_{ia} \sigma_T}{-0,25 \ln(1-\Psi)} \right]^{\frac{1}{m}} + \frac{(\tilde{\sigma}_a / \tilde{\sigma}_{-1})^{\frac{1}{\mu}}}{N_0} = N_f^{-1}, \quad (10)$$

где $\tilde{\sigma}_{-1} = \sigma_{-1} / \sigma_T$; $\tilde{\sigma}_{ia} = \sigma_{ia} / \sigma_T$; $\tilde{\varepsilon}_{ia} = \varepsilon_{ia} / \varepsilon_T$.

Коэффициенты K_1, K_2, K_3 определяются через характеристики обобщенной диаграммы циклического деформирования.

Если повреждения Π_p существенно меньше, чем Π_y , и ими можно пренебречь, то выражения (9)-(10) превращаются в обычное уравнение кривой усталости $\sigma_a^{1/\mu} N = \sigma_{-1}^{1/\mu} N_0$. Если пренебречь величиной повреждения Π_y , то из выражения (8) можно получить известную степенную зависимость Мэнсона-Корффина.

Сопоставление с экспериментальными данными расчетных кривых усталости образцов из сплавов Д16 и В95 при мягком и жестком нагружениях показало, что кривые, рассчитанные по предложенным уравнениям, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными точками, в то время, как зависимости Б.Лангера и С. Мэнсона дают существенные отклонения.

Таким образом получено универсальное критериальное уравнение для расчета долговечности на стадии образования усталостной трещины при мало- и многоцикловом нагружении. Уравнение является синтезом силовых и деформационных критериев разрушения и включает в себя комплекс основных характеристик механического поведения металла, хорошо изученный в климатическом диапазоне изменения температуры. Чтобы использовать это уравнение для прогнозирования долговечности конструктивных элементов, необходимо установить соответствие между напряжениями и деформациями равной повреждаемости стандартного образца и элемента. Расчет напряжений равной повреждаемости обычно осуществляется с помощью эффективных коэффициентов концентрации напряжений $K_{\sigma}^{3\Phi}$. При отсутствии в концентраторе пластических деформаций В.П.Когаевым разработаны надежные методы расчета величины $K_{\sigma}^{3\Phi}$. Чтобы учесть при расчете напряжений равной повреждаемости пластические деформации, возникающие в зонах концентрации, потребовалось дополнительное исследование.

В работе использованы принцип эквивалентности и теория подобия малоциклового усталостного разрушения В.И.Добровольского, согласно которой взаимосвязь полей интенсивности деформации равной повреждаемости стандартного образца и элемента определяется критериями подобия K_{γ} и K :

$$K_{\gamma} = \int_{A_{\sigma\text{и}}} f_{\sigma}^{\frac{1}{m}} dA / \int_{A_{\sigma\text{и}}} f_{\sigma\Phi}^{\frac{1}{m}} dA; \quad K = \int_{A_{\sigma\text{и}}} f_{\sigma}^{\frac{1}{m}} dA / \int_{A_{\sigma\text{и}}} f_{\sigma}^{\frac{1}{m}} dA, \quad (II)$$

где f_{σ} , $f_{\sigma\Phi}$, f_{σ} - функции, характеризующие распределение интенсивности деформаций по сечениям соответственно стандартного образца, гладкого образца и элемента; $A_{\sigma\text{и}}$, $A_{\sigma\Phi}$, A_{σ} - части площади соответственно стандартного образца, гладкого образца и элемента, где $\epsilon_i > \epsilon_i$ ($\epsilon_i = \epsilon_{\infty} \epsilon_{iR}$ - минимальная амплитуда повреждающей ϵ_i); ϵ_{∞} - предельное значение масштабного фактора; ϵ_{iR} - амплитуда интенсивности деформаций, соответствующая σ_{iR} .

Вводя критерии подобия в представленное решение задачи о концентрации напряжений при упругопластическом деформировании, получены зависимости для расчета эффективных деформаций

$$\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}} = \tilde{K}^m \epsilon_n (f_i^e)_{\max} \tilde{\sigma}_n^1 + (1 - \tilde{K}^m) \epsilon_n \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR} \quad (I2)$$

и напряжений:

- при линейном упрочнении

$$\tilde{\sigma}_{nm}^{\text{эф}} = \frac{(1 - \tilde{E}_T)}{f_i^e} (f_{nm} - \delta_{nm} f) - \frac{1 - \tilde{K}^m}{(f_i^e)_{\max}} \epsilon_n \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR} [\delta_{nm} f^* + \tilde{E}_T (f_{nm} - \delta_{nm} f)] + \epsilon_n \tilde{K}^m \tilde{\sigma}_n^1 [\delta_{nm} f^* + \tilde{E}_T (f_{nm} - \delta_{nm} f)]; \quad (I3)$$

- при степенном упрочнении

$$\tilde{\sigma}_{nm}^{\text{эф}} = \frac{(f_i^e)^{n-1}}{(f_i^e)_{\max}^n} (f_{nm} - \delta_{nm} f) [\tilde{K}^m (f_i^e)_{\max} \tilde{\sigma}_n^1 \epsilon_n + (1 - \tilde{K}^m) \epsilon_n \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR}]^n - \frac{\delta_{nm} f^*}{(f_i^e)_{\max}} [\tilde{K}^m (f_i^e)_{\max} \times \tilde{\sigma}_n^1 \epsilon_n + (1 - \tilde{K}^m) \epsilon_n \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR}]. \quad (I4)$$

где ϵ_n - поверхностный фактор; $(f_i^e)_{\max}$ - максимальное значение f_i^e ; $K = K_v / K$.

Выражая функции f_c , f_{δ} , S_{δ} через относительные градиенты соответствующих интенсивностей деформации и принимая $m = 0,5$, получены зависимости для расчета \tilde{K} :

при $\tilde{\sigma}_n^1 > \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR}$

$$\tilde{K} = 1 - \frac{(f_i^e)_{\max} - 1}{(f_i^e)_{\max}} + \frac{1}{3} \left[\frac{(f_i^e)_{\max} - 1}{(f_i^e)_{\max}} \right]^2, \quad (I5)$$

при $\tilde{\sigma}_n^1 < \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR}$

$$\tilde{K} = \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR} / (\tilde{\epsilon}_i)_{\max} + \frac{1}{3} \left(1 - \epsilon_{\infty} \tilde{\epsilon}_{iR} / (\tilde{\epsilon}_i)_{\max} \right)^2, \quad (I6)$$

где $(\tilde{\epsilon}_i)_{\max}$ - величина $\tilde{\epsilon}_i$ в наиболее нагруженном волокне.

Универсальное критериальное уравнение и зависимости для эффективных напряжений и деформаций позволяют записать выражение кривой усталости элемента в виде

$$K_4 \left[\frac{(\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}})_a - \frac{2}{3}(1+\nu)(\tilde{\sigma}_{ia}^{\text{эф}})^1}{-0,25 \frac{\Delta}{e_T} \ln(1-\psi) - (\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}})_m} \right]^{\frac{1}{m}} + K_5 \left[\frac{\tilde{\sigma}_{np}^1 \left(1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b} \frac{1+\nu_e}{1-\nu_e}\right)}{\tilde{\sigma}_{-1} N_0^m} \right]^{\frac{1}{m}} = N_f^{-1} \quad (17)$$

где K_4, K_5 - коэффициенты; D - коэффициент снижения предельных пластических деформаций; σ_b - предел прочности; ν_e - коэффициент асимметрии деформаций; $(\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}})_a, (\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}})_m$ - соответственно амплитудное и среднее значение $\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}}$ в цикле; $(\tilde{\sigma}_{ia}^{\text{эф}})^1, \tilde{\sigma}_{np}^1$ - значения $\tilde{\sigma}_{ia}^{\text{эф}}$ и $\tilde{\sigma}_{np}$ при первом нагружении из исходного состояния ($\tilde{\sigma}_{np}$ - эффективные напряжения при сложном напряженном состоянии, приведенные по повреждающей способности к одноосным). Для циклически стабильного и циклически разупрочняющегося материала $K_4 = K_5 = 1$; для циклически упрочняющегося

$$K_4 = \frac{1}{N_f} \int_1^{N_f} (1 - \tilde{a}_i \lg N)^{\frac{1}{m}} dN; \quad (18)$$

$$K_5 = \frac{1}{N_f} \int_1^{N_f} (1 + \tilde{a}_{np} \lg N)^{\frac{1}{m}} dN,$$

где $\tilde{a}_i, \tilde{a}_{np}$ - коэффициенты, учитывающие изменения соответственно $\tilde{\sigma}_{ia}, \tilde{\sigma}_{np}$ в процессе циклического упрочнения материала. Для циклически разупрочняющегося материала значения $(\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}})_a, (\tilde{\epsilon}_i^{\text{эф}})_m, (\tilde{\sigma}_{ia}^{\text{эф}})^1$ и $\tilde{\sigma}_{np}$ определяются при $\tilde{E}_T = \nu = 0$.

Экспериментальные данные, необходимые для проверки метода расчета долговечности элементов, получены в лаборатории циклической пластичности Института машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР, а также взяты из литературы. Установлено, что при $\tilde{\sigma}_n < 1$ значения $\tilde{\sigma}_x^{\text{эф}}(N_f)$ на контуре кругового отверстия в пластине (сплавы Д16 и В95; $\alpha_\sigma = 2,6$) и приведенные напряжения $\tilde{\sigma}_{np}(N_f)$ в вершине надреза в цилиндрическом стержне (сталь 45, 12ХМ; $\alpha_\sigma = 2,45$ и $3,35$) практически совпадают с разрушающими напряжениями $\sigma_p(N_f)$ в гладких образцах. Погрешность несовпадения не превышает 10 %.

Анализ экспериментальных данных и расчетных кривых уста-

лости, полученных по уравнению (17) и зависимостям С.Мэнсона, Б.Лангера, показывает, что кривые усталости, построенные с помощью уравнения (17) достаточно хорошо совпадают с экспериментальными точками как при $T_0 = 293$ К, так и низких температурах (218 и 113 К). Например, при заданной долговечности отклонения расчетных номинальных разрушающих напряжений от экспериментальных для пластины с отверстием (сплавы Д16 и В95) не превышают 10%. Расчет, основанный на зависимости Б.Лангера, дает существенно заниженную долговечность (в 10 и более раз). Достаточно хорошо совпадают с результатами эксперимента и кривые усталости для пластины с отверстием, построенные по зависимостям С.Мэнсона. Однако расчет сопротивления усталостному разрушению цилиндрических образцов (сталь 45, 12ХМ), основанный на соотношении С.Мэнсона, также дает заниженную (на порядок и более) долговечность. Сопоставление полученных с помощью рассмотренного метода расчетных $N_f^{РАС}$ и экспериментальных $N_f^{ЭКС}$ долговечностей элементов (гладкие образцы, пластины с круговым и прямоугольным отверстиями, с боковыми надрезами, стержень с кольцевой выточкой) из сплавов Д16, В95, сталей 45, 1Х2М, 15Г2АФпс, 15Х2МФА показало, что отклонения значений $N_f^{РАС}$ от $N_f^{ЭКС}$ в широком диапазоне изменения $N = 10^2 \dots 10^6$ не превышает 2...4 раз.

4. Анализ стохастического процесса усталостного разрушения элементов. Использование при низких температурах в качестве показателя 50% ресурса изделия может привести к неверным выводам. Поэтому для оценок хладостойкости элементов необходим вероятностный анализ процесса усталостного разрушения. Наряду с численными методами при проектировании "северной" техники необходимы аналитические способы анализа характеристик стохастического процесса накопления усталостных повреждений. Для разработки таких методов целесообразно представление случайных функций в виде канонических разложений. В каноническом представлении случайной функции ее зависимость от аргумента (времени) выражается при помощи вполне определенных, не случайных функций. Это дает возможность свести выполнение различных операций над случайными процессами к обычным операциям анализа.

Вероятностные модели двух стадий процесса усталостного разрушения получены явным введением стохастических элементов в уже известные детерминистические дифференциальные соотношения

и интегрированием полученных стохастических уравнений. Это позволило представить выражения стохастических функций, описывающих процесс усталостного разрушения, в виде канонических разложений по некоррелированным случайным величинам, характеризующим статистический разброс свойств материала и эксплуатационных нагрузок.

Модель процесса накопления усталостных повреждений создана явным введением стохастических элементов в кинетическое уравнение коррелированной линейной теории суммирования усталостных повреждений:

$$\begin{aligned} d\P / dN &= \Psi [\sigma_{ан}(N), r(N), \alpha_1, \dots, \alpha_{i_1}]; \\ \Pi(0) &= 0; \quad \alpha_p - \Pi(N_f) = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\Pi(N)$ - мера повреждений; $\alpha_1, \dots, \alpha_{i_1}$ - коэффициенты аппроксимации исходной кривой усталости элемента; $\sigma_{ан}(N)$, $r(N)$ - функции, характеризующие соответственно изменения амплитуды номинального напряжения и коэффициента асимметрии номинальных напряжений в процессе нагружения; α_p - скорректированная сумма относительных повреждений. Вид функции Ψ зависит от выбора аналитического выражения кривой усталости исследуемого объекта. Методика построения кривой усталости элемента по критерию образования трещины изложена выше.

Используя метод малого параметра и теорию канонических разложений случайных функций, в работе проинтегрировано уравнение (19) при случайных величинах α_j и случайных функциях $\sigma_{ан}(N)$, $r(N)$. В результате было получено каноническое разложение меры повреждений:

$$\Pi(N) = \langle \Pi(N) \rangle + \sum_{j=1}^{j_1} \beta_j(N) \alpha_j, \quad (20)$$

где $\langle \Pi(N) \rangle$ - математическое ожидание $\Pi(N)$; $\beta_j(N)$ - известные неслучайные функции; α_j - некоррелированные случайные величины, характеризующие статистический разброс свойств материала и эксплуатационных нагрузок. При конкретизации канонических разложений эксплуатационная нагруженность элемента представлялась в виде блска нагрузки, на каждой ступени которого амплитуда напряжений и асимметрии цикла - случайные величины.

Полученные формулы для меры повреждений представляют обычные функциональные связи величин Π и α_j ; в которые число

циклов N входит как параметр. Вероятностные свойства функции $\Pi = \Pi(N)$ полностью определяются совместной плотностью распределения вероятностей величин α_j . Вероятность возникновения усталостной трещины в элементе равна

$$P_3(N_f) = P[\alpha_p - \Pi(N_f) < 0]. \quad (21)$$

Дифференцируя зависимость $P_3(N_f)$ по параметру N_f , получено выражение для плотности распределения величины $N_f - P_{1N}(N_f)$.

Для оценки точности разработанной методики анализа стохастического процесса накопления усталостных повреждений проведено сопоставление расчетных кривых распределения долговечностей образцов из алюминиевых сплавов В95 и АВ с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Из полученных результатов следует, что расчетные кривые достаточно хорошо совпадают с экспериментальными точками.

Вероятностная модель процесса распространения трещины при циклическом нагружении создана явным введением стохастических элементов в уравнение

$$dl/dN = \phi[\Delta K(N), r(N), \beta_1, \dots, \beta_{i_1}] \quad (22)$$

и его интегрированием при случайных характеристиках кинетической диаграммы усталостного разрушения $\beta_1, \dots, \beta_{i_1}$ и случайных функциях $\Delta b(N), r(N)$. Здесь $\Delta K(N)$ - размах КИН в N -ном цикле.

В работе построены канонические разложения стохастических функций $l(N)$ и $K(N)$:

$$l(N) = \langle l(N) \rangle + \sum_{i=1}^{i_1} z_i(N) \beta_i; \quad (23)$$

$$K(N) = \langle K(N) \rangle + \sum_{i=1}^{i_2} z_i^*(N) \beta_i, \quad (24)$$

где $\langle l(N) \rangle, K(N)$ - математическое ожидание соответственно $l(N)$ и $K(N)$; $z_i(N), z_i^*(N)$ - известные неслучайные функции; β_i - некоррелированные случайные величины.

При конкретизации канонических разложений (23) и (24) модель роста усталостной трещины записывалась так:

$$\frac{dl}{dN} = \begin{cases} 0 & K \leq K_{th}; \\ 10^7 \omega(r) \cdot \theta(\Delta K/K_{-1}^*)^{m-1}, & K_{th} < K < K_{fc}; \\ \infty & K \geq K_{fc}. \end{cases} \quad (25)$$

где K_{th} - пороговое значение КИН; K_{fc} - критическое значение КИН при циклическом нагружении; K_{-1}, m_{-1} - характеристики кинетической диаграммы усталостного разрушения; θ - коэффициент, учитывающий эффект торможения трещины при смене уровня напряжений в соседних циклах; $\omega(\gamma)$ - функция, характеризующая зависимость скорости роста трещины от асимметрии цикла γ .

С помощью канонических разложений (23) и (24) определена вероятность окончательного разрушения элемента:

$$P_p(N_p) = P[K_{fc} - K(N_p) \leq 0], \quad (26)$$

где $N_p = N_\Sigma - N_f$ - число циклов на стадии распространения трещины.

Дифференцируя зависимость (26) по параметру N_p , получено выражение для плотности распределения величины $N_p - P_{2N}(N_p)$.

Условная плотность распределения числа циклов N_Σ при фиксированном N_f вычислялась по формуле

$$P_{3N}(N_\Sigma | N_f) = P_{2N}(N_\Sigma - N_f). \quad (27)$$

Через плотности распределения $P_{1N}(N_f)$ и $P_{3N}(N_\Sigma | N_f)$ осуществлялся расчет вероятности окончательного разрушения элемента в N -ном цикле нагружения.

Проведено сопоставление результатов расчета стохастических характеристик модели, описывающей процесс распространения усталостной трещины, с данными экспериментов (Армягов А.А., Нешпор Г.С. // Физ.-хим. механика материалов. 1985. № 5. С. 58-62). Установлено, что характеристики, полученные расчетным путем, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными точками. Об этом свидетельствуют приведенные данные об изменении коэффициента вариации скорости роста трещины $\tilde{\zeta}_v$ в зависимости от размаха КИН ΔK ($\tilde{\zeta}_v^{экс}$, $\tilde{\zeta}_v^{рас}$ - соответственно экспериментальные и расчетные данные):

Сплав Д16			Сплав АМГ6		
$\Delta K, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\tilde{\zeta}_v^{экс}, \%$	$\tilde{\zeta}_v^{рас}, \%$	$\Delta K, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\tilde{\zeta}_v^{экс}, \%$	$\tilde{\zeta}_v^{рас}, \%$
12,8	18,3	14,9	13,1	18,2	18,5
14,5	13,4	13,8	15,0	17,5	18,4
26,5	19,2	22,8	18,3	15,5	18,5
31,2	23,4	26,7	23,9	15,6	18,7
34,4	29,2	29,3	34,4	19,3	19,3

Для определения коэффициента θ разработана инженерная методика расчета числа циклов задержки в развитии усталостной трещины после перегрузки. В отличие от имеющихся способов она не требует проведения сложных измерений и трудоемких вычислений. Методика основана на следующих положениях:

1. Торможение трещины после перегрузки обусловлено остаточными сжимающими напряжениями $\sigma_{ост}$.

2. Распределение напряжений в зоне, где $\sigma_{0,2} < \sigma_1 \leq \sigma_B$, описывается коэффициентом интенсивности напряжений в упругопластической области $K_{1\sigma}$.

Для проверки предложенной методики определения числа циклов задержки N_D проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными. Установлено, что разница расчетных и экспериментальных значений N_D не превышает 2...3 раз. С учетом обычного рассеяния циклической долговечности такую точность прогноза следует признать удовлетворительной.

5. Оценка надежности стальных бункеров горнодобывающей промышленности Севера по критериям усталостной прочности. Разработанные методы расчета долговечности элементов апробированы при оценке надежности стальных бункеров. В соответствии с заказом объединения Якутуголь Минуглепрома СССР проведено комплексное обследование технического состояния стальных бункеров емкостью 700 т, эксплуатирующихся на обогатительной фабрике разреза "Нерюнгринский". Бункеры - сварные, прямоугольного сечения, пирамидальной конфигурации с призматической частью в зоне расположения главных балок. Стенки бункеров закреплены поперечными ребрами жесткости. Материал основного слоя стенки бункера - сталь марки 09Г2С. В процессе эксплуатации бункеры периодически наполняются размельченным концентратом и опорожняются. После двух лет эксплуатации обнаружено массовое появление усталостных трещин в узлах сопряжения наиболее нагруженных горизонтальных ребер жесткости. Дальнейшая эксплуатация бункеров вызывала резкое повышение деформативности узлов. В результате распорные усилия перераспределялись на сварные швы обшивки, и они разрушались. Разрушение распространялось на участок длиной до 3 м. Выявлено также, что в корне горизонтального шва, соединяющего обшивку с балкой, имеются протяженные трещинообразные неспавы глубиной l_0 .

Были обработаны диаграммы самописцев, отражающие уровень заполнения бункеров. Установлено: случайная величина загрузки бункера \tilde{V} подчиняется нормальному закону распределения; среднее значение загрузки $\langle \tilde{V} \rangle$ составляет 94%; коэффициент вариации величины $\tilde{V} - \nu_{\tilde{V}} = 15\%$; среднее число циклов нагружения в течение года эксплуатации - 1700. Осуществлены расчеты функции распределения долговечности узла сопряжения ребра жесткости на стадии образования усталостной трещины, а также вероятности прорастания технологических дефектов в обшивке бункера в процессе эксплуатации. Установлено, что в зависимости от величины относительной загрузки \tilde{V} , долговечность узла по критерию образования усталостной трещины t_3 (годы) при вероятности $P = 50\%$ определяется из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} t_3 &= 0,464 \tilde{V}^{-7,83}, \text{ при } 0,5 \leq \tilde{V} < 0,75; \\ t_3 &= 2,47 \tilde{V}^{-2,01}, \text{ при } 0,75 \leq \tilde{V} < 1,2. \end{aligned} \quad (28)$$

Анализ функции распределения долговечности исследуемого узла показал, что вероятность образования усталостной трещины в первый год не превышает 1%. Затем по мере накопления усталостных повреждений в металле величина P_3 начинает резко возрастать и после 2,5...3 лет эксплуатации 50% ресурс узла по критерию образования усталостной трещины исчерпывается. Расчетная кривая хорошо совпадает с экспериментальными точками, характеризующими фактические случаи образования трещин.

В качестве показателя надежности обшивки бункера с трещинообразными дефектами использована вероятность прорастания дефекта в процессе эксплуатации до критического размера, при достижении которого резко возрастает скорость роста дефекта, и возможно хрупкое разрушение обшивки. Установлено, что вероятность разрушения шва P_p в первый год не превышает 0,02%. Затем P_p начинает резко возрастать, и после 5...6 лет эксплуатации 50% ресурс сварного соединения исчерпывается. Расчетная кривая практически проходит через экспериментальные точки, характеризующие действительные случаи разрушения.

Для разработки рекомендаций по повышению эксплуатационной надежности бункеров рассмотрены следующие режимы нагружения бункеров: максимальный уровень загруженности ограничивается величиной $\tilde{V} = 74\%$; посредством полной загрузки $\tilde{V} = 100\%$ периодически осуществляется опрессовка бункера. Периодичность

опрессовки определена по числу циклов задержки развития трещины, установленному расчетом. Выявлено, что число циклов задержки в развитии трещины $N_D = 1,8 \times 10^3$ циклов, а рекомендуемый период эксплуатации между двумя опрессовками - 6...7 месяцев.

На основании проведенного исследования разработаны рекомендации по повышению эксплуатационной надежности бункеров. Рекомендации внедрены в производство.

6. Оценка хладостойкости деталей машин и элементов конструкций. Инженерные расчеты, по результатам которых оцениваются прочность и надежность элементов при низких температурах, целесообразно представить в виде специальной системы расчетов на хладостойкость. В нее входят: виды предельных состояний и факторы, ограничивающие хладостойкость несущих конструкций; показатели хладостойкости; методы их расчета; методика технико-экономического анализа показателей. На практике не всегда имеется достаточно полный объем данных о характеристиках прочности и нагруженности исследуемого объекта, определяющий точность расчетных оценок. Поэтому расчет хладостойкости носит сравнительный характер: вычисляется не абсолютное значение, а относительное изменение того или иного показателя при снижении температуры. Полученные таким образом данные используются для сопоставления с базовыми (нормативными) показателями. В качестве показателей хладостойкости элементов предложены следующие величины $\Delta \tilde{n}_3$, \tilde{t} и \tilde{p} . Величина $\Delta \tilde{n}_3$ характеризует изменение запаса прочности при низких температурах:

$$\Delta \tilde{n}_3 = (n_{3H} - n_{3B}) / n_{3B}, \quad (29)$$

где n_{3H} , n_{3B} - расчетные запасы прочности с учетом и без учета эксплуатации конструкции при низких температурах.

Величина \tilde{t} показывает изменение ресурса элемента при эксплуатации в условиях низких температур:

$$\tilde{t} = t_H / t_B, \quad (30)$$

где t_H , t_B - расчетные ресурсы элемента при заданной вероятности разрушения с учетом и без учета эксплуатации в условиях низких температур.

Величина \tilde{p} определяет изменение вероятности "неразрушения" элемента, вызванное эксплуатацией конструкции при низких температурах. Значение \tilde{p} вычисляется следующим образом:

$$\tilde{p} = (1 - p_H) / (1 - p_B), \quad (31)$$

где P_H , P_B - расчетные вероятности разрушения элемента при заданном ресурсе с учетом и без учета эксплуатации при низких температурах.

Между показателями $\Delta\tilde{n}_3$, \tilde{t} и \tilde{r} можно установить соотношения взаимности. Поэтому нет смысла полагать, что каждый из них, взятый в отдельности, еще не характеризует уровень хладостойкости объекта. Вместе с тем очевидна необходимость их раздельного определения, так как технико-экономический анализ трех показателей позволяет выбрать тот режим работы машины (с учетом возможного снижения производительности, ограничения ресурса отдельных элементов в зимний период и т.п.), при котором обеспечивается ее эксплуатация с максимально возможной прибылью при минимальном ущербе, вызванном ненадежной работой машины в условиях низких температур. Основные положения данной методики разработаны и описаны в работе.

Рассмотренные подходы использованы для исследования влияния на хладостойкость факторов, ограничивающих несущую способность элементов при низких температурах.

Рост концентрации напряжений и уменьшение располагаемой пластичности металлов при снижении температуры обуславливают повышение интенсивности процессов накопления усталостных повреждений. В результате возможно более существенное, чем при $T_0 = 293$ К, снижение исходного предела выносливости элементов, уменьшение фактических запасов прочности и ресурса, повышение риска отказа конструкции. Дана количественная оценка рассматриваемого явления. Для исследования выбраны стали 45, Ст.3 и 18ХНВА. Расчеты показателей $\Delta\tilde{n}_3$, \tilde{t} и \tilde{r} проведены при $T = 200$ К для пластин и валов с различными концентраторами напряжений ($\alpha_\sigma = 1,98 \dots 5,1$). Анализ полученных данных показывает, что при повышении номинальных напряжений показатель \tilde{t} для элементов, изготовленных из сталей 45 и Ст.3, снижается от значений $\tilde{t} > 1$ до $\tilde{t} = 0,5 \dots 0,6$. Затем величина \tilde{t} начинает возрастать. При повышении уровня пластического деформирования в зонах концентрации напряжений для элементов из стали 18ХНВА показатель \tilde{t} монотонно снижается от 1,5 до 0,9. Установлено, что если элемент конструкции изготовлен из металла, склонного при снижении температуры к резкому росту сопротивления начальной пластической деформации или к уменьше-

нию располагаемой пластичности, то его долговечность в переходной области от мало- к многоциклового усталости при низкой температуре ($T = 200 \text{ K}$) в 1,5...2 раз меньше, чем при $T_0 = 293 \text{ K}$. Отрицательное влияние температуры на долговечность элементов возрастает при уменьшении исходной пластичности материала и ухудшении качества обработки поверхности. Циклические перегрузки высокого уровня при $T = 200 \text{ K}$ вызывают более существенное, чем при $T_0 = 293 \text{ K}$, снижение исходного предела выносливости этих элементов. Так, коэффициент K_T , характеризующий отношение пределов выносливости поврежденного материала при $T_0 = 293 \text{ K}$ и низкой T ($K_T = [\sigma_{-1 \text{ пов}}]_{T_0} / [\sigma_{-1 \text{ пов}}]_T$), увеличивается с ростом уровня перегрузки от 0,8 до 1,3...1,5. Это приводит к снижению запаса прочности на 20...40%.

В работе исследовалась хладостойкость элементов с трещинами и сварных соединений с трещинообразными дефектами. Установлено, что при понижении температуры ниже $T_{кр2}$ ($T_{кр2}$ - вторая критическая температура хрупкости) в 2 и более раз уменьшается запас прочности элементов с трещинами. Снижение запаса прочности при повышении скорости нагружения значительно меньше, чем в результате воздействия низких эксплуатационных температур. Так, для элементов из малоуглеродистых сталей при изменении времени до разрушения на 4 порядка по сравнению со статическим нагружением величина n , снижается лишь на 19%.

Одним из способов повышения ресурса конструкции на стадии живучести является ее опрессовка. На примере стали 15Х2МФА изучено влияние температуры на число циклов задержки развития усталостной трещины N_D . Установлено, что при снижении T возможно как увеличение, так и уменьшение числа циклов N_D , хотя разница в значениях N_D при $T_0 = 293 \text{ K}$ и низких температурах (183...243 K) невелика (до 2...3 раз). Рассмотрен случай, когда статическая перегрузка производится при $T_0 = 293 \text{ K}$, а основное нагружение конструкции осуществляется при низкой температуре. Показано, что перегрузка при $T = 293 \text{ K}$ увеличивает в 1,6...3,6 раз число циклов N_D по сравнению с перегрузкой того же уровня в условиях низкой температуры. Поэтому эффективность опрессовки конструкции как технологической операции, повышающей ресурс конструкции на стадии живучести, при $T_0 = 293 \text{ K}$ выше, чем при низкой температуре. Были построены и проанализи-

рованы функции распределения долговечности на стадии живучести ряда деталей и элементов: пластина с двумя усталостными трещинами, выходящими на контур кругового отверстия; крепежная шпилька с кольцевой усталостной трещиной в свободном витке резьбы и в первом рабочем витке; двух- и односторонние сварные стыковые соединения с неполным проплавлением; с боковым подрезом; обечайки сосуда давления с многослойной и монометаллической стенками. Элементы изготовлены из сталей 15Х2МФА, 15Х2НМФА, Ст.3 сп, 14Г2, 03Х13АГ19. В результате анализа полученных данных установлено следующее. При снижении температуры уменьшается наклон кривой (величина dP_p/dN_p), характеризующей вероятность окончательного разрушения элементов к оси абсцисс. Возрастает разброс долговечности элементов с трещинами. Поэтому оценка хладостойкости элементов по осредненным показателям недостаточна. Необходимо определять их хладостойкость при требуемом уровне надежности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Оценку и прогнозирование хладостойкости несущих конструкций нельзя отождествлять с расчетом объекта на хрупкую прочность. Для решения рассматриваемой проблемы необходимо располагать количественными данными, характеризующими возможные процессы реализации исходной надежности изделия при базовой $T_0 = 293$ К и низких температурах.

2. Установлено, что при снижении температуры изменяется характер распределения напряжений в окрестностях концентратора. Существенно возрастают составляющие σ_x , σ_y , σ_z . Максимум напряжений смещается из глубины зоны пластической деформации к вершине надреза. Коэффициент концентрации напряжений в упругопластической области при снижении температуры от 293 до 200 К увеличивается на 10...40%, при понижении до 77 К — на 20...50% и более. Процесс кинетики напряжений, вызванный циклическим упрочнением металла, при упругом номинальном напряженном состоянии близок к жесткому и в полудогарифмических координатах описывается линейной аппроксимирующей зависимостью; при циклическом разупрочнении напряжения в пластической зоне снижаются в течение 30...50 полуциклов и их уровень приближается к величине σ_T .

3. Разработан метод оценки долговечности по критерию об-

разования усталостной трещины, позволяющей расчетным путем без дополнительных эмпирических коэффициентов на основе предложенной модели накопления усталостных повреждений в неоднородном поле деформаций прогнозировать долговечность элементов в широком диапазоне циклов нагружения $N = 10^2 \dots 10^6$ при $T = 293$ К и низких температурах. Модель включает: а) универсальное критериальное уравнение, являющееся синтезом силовых и деформационных критериев; б) зависимости для расчета эффективных напряжений и деформаций в зонах концентрации при упругопластическом деформировании металла.

4. В результате экспериментальной проверки метода расчета долговечности элементов установлено:

- при упругом номинальном напряженном состоянии расчетные значения эффективных напряжений в зонах концентрации с достаточной точностью совпадают с экспериментальными (погрешность не превышает 10%);

- точность прогноза долговечности при использовании предложенных уравнений значительно выше, чем по известным зависимостям С.Мэнсона и Б.Лангера; отклонение расчетных значений долговечности элементов от экспериментальных в широком диапазоне изменения $N = 10^2 \dots 10^6$ при $T = 293$ К и низких температурах не превышает 2...4 раз.

5. Разработан аналитический способ вероятностного анализа процесса усталостного разрушения, который позволил построить выражения стохастических функций, описывающих процесс, в виде канонических разложений по некоррелированным случайным величинам, характеризующим статистический разброс свойств материала и эксплуатационных нагрузок. Установлено, что расчетные характеристики рассматриваемого стохастического процесса достаточно хорошо совпадают с экспериментальными.

6. Сформулированы принципиальные положения, и создана система расчетной оценки хладостойкости деталей и элементов. Она включает: а) установленные виды предельных состояний и факторы, ограничивающие хладостойкость несущих конструкций; б) предложенные комплексные показатели хладостойкости, характеризующие изменения запаса прочности, ресурса и вероятности "неразрушения" элементов при понижении температуры; в) методы расчета показателей хладостойкости, отличительной осо-

бенностью которых является то, что они позволяют использовать имеющуюся систему справочной информации; г) методику технико-экономического анализа показателей.

7. В результате исследования хладостойкости элементов установлено:

- если элемент изготовлен из металла, склонного при снижении температуры к резкому росту сопротивления начальной пластической деформации или к уменьшению располагаемой пластичности, то его долговечность в переходной области от мало- к многоциклового усталости при $T_0 = 200$ К в 1,5...2 раза меньше, чем при $T_0 = 293$ К; циклические перегрузки высокого уровня при $T = 200$ К вызывают более существенное, чем при $T_0 = 293$ К, снижение исходного предела выносливости и фактического запаса прочности этих элементов (на 20...40%);

- при понижении температуры T ниже $T_{кр2}$ в 2 и более раз уменьшается запас прочности элементов с трещинами;

- статическая перегрузка при $T_0 = 293$ К увеличивает в 1,6...3,6 раза число циклов замедленного развития трещины по сравнению с перегрузкой того же уровня при $T = 243...183$ К, поэтому эффективность опрессовки конструкции как технологической операции, повышающей ее ресурс на стадии живучести, при низких температурах существенно меньше, чем при $T_0 = 293$ К;

- использование в качестве показателя при оценке влияния низких температур на долговечность элементов с трещинами 50% ресурса неправомерно, так как может привести к неверному выводу; необходимо определять их хладостойкость при требуемом уровне надежности.

8. Осуществлена оценка надежности стальных бункеров горнодобывающей промышленности Севера. На основании полученных результатов разработаны и внедрены в производство рекомендации по повышению их надежности.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. К определению вязкости разрушения сварных соединений листового стали /В.П.Гуляев, В.П.Ларионов, В.Р.Кузьмин и др.// Пробл.прочности. - 1975. - С. 45 - 48.
2. Испытания полноразмерных сосудов из стали 14Х2ГМР при отрицательных температурах (В.П.Ларионов, Р.С.Григорьев,

- М.Д.Новопашин, В.Л.Игнатов, В.Р.Кузьмин, В.П.Гуляев, Т.С. Сосин //Бюллетень научно-технической информации. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР. - 1975. - С. II - 17.
3. Новопашин М.Д., Кузьмин В.Р. Исследование влияния стрингеров и подкрепляющих накладок на распределение деформаций в районе прямоугольного отверстия //Прочность конструкций летательных аппаратов. - Харьков: Харьковский авиационный институт. - 1977. - Вып.4. - С. 87 - 92.
 4. Кузьмин В.Р. Кинетика напряженно-деформированного состояния в зонах концентрации напряжений //Работоспособность техники в условиях климатических температур. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1978. - С.93 - 101.
 5. Кузьмин В.Р. Концентрация напряжений и деформаций в цилиндрическом стержне с кольцевым надрезом при циклическом упругопластическом деформировании //Сварка и хрупкое разрушение. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1978. - С.49-59.
 6. Кузьмин В.Р. Концентрация напряжений и деформаций при переменных нагрузках в пластинах и стержнях //Тез.докл. III Всесоюзного симпозиума "Малоцикловая усталость элементов конструкций". - Вильнюс: Вильн.инженерно-строительный институт. 1979. - Вып.4. - С. 167 - 170.
 7. Кузьмин В.Р. Влияние неупругости металлов при циклическом деформировании на концентрацию напряжений //Работоспособность деталей машин и конструкций в условиях низких температур. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1979. - С.77 - 84.
 8. Кузьмин В.Р. Методика обработки результатов измерений упругопластических деформаций при циклическом однопараметрическом нагружении //Работоспособность деталей машин и конструкций в условиях низких температур. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР. 1979. - С. 72 - 76.
 9. Новопашин М.Д., Кузьмин В.Р. Концентрация деформаций и разрушение пластины с прямоугольным отверстием //Тез. докл. научно-технической конференции "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов". - Калининград: НТО им. ак.А.Н.Крылова, 1979 - С. 77 - 79.
 10. Кузьмин В.Р. Методика расчета напряженно-деформационного состояния в зонах концентрации напряжений по показаниям тензорезисторов//Сварка и хрупкое разрушение. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1980. - С. 59 - 70.

- II. Испытания сосудов, выполненных электрошлаковой сваркой без нормализации, с использованием методов механики разрушения /С.В.Егоров, В.С.Гиренко, Ю.А.Стеренбоген, В.П.Ларионов, В.Р.Кузьмин, А.В.Юрчишин //Автоматическая сварка, 1981. - № 8- С. 35 - 40.
12. Кузьмин В.Р., Новопапин М.Д. Влияние циклического нагружения на концентрацию напряжений и деформаций в пластинах и стержнях //Тез.докладов Всесоюзной конференции "Повышение долговечности и надежности машин и приборов" - Куйбышев: Куйбышевский политехнический институт. - 1981. - С. 203 - 205.
13. Кузьмин В.Р. Системный анализ и расчетные методы оценки хладостойкости несущих конструкций //Механика разрушения и прочность конструкций при низких температурах. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1983. - С. 3 - 17.
14. Кузьмин В.Р. Концентрация напряжений и надежность несущей конструкции при низких климатических температурах //Тез.докл. Уральской зональной конференции "Пути повышения надежности и ресурса систем машин". - Свердловск: Свердловский областной НТО Машпром, 1983. - С. II - 12.
15. Кузьмин В.Р. Учет влияния особенностей деформирования материала в зонах концентрации напряжений на хладостойкость элементов конструкций //Тез.докл. VIII Всесоюзной конференции по прочности и пластичности. - Пермь: Уральский научный центр АН СССР, 1983. - С. 109.
16. Кузьмин В.Р. Влияние низких температур на концентрацию напряжений в элементах конструкций //Тезисы научно-технической конференции "Применение методов механики разрушения в расчетах строительных металлических конструкций на хрупкую прочность и долговечность". - Красноярск: Красноярский Промстройинипроект. - С. 153 - 154.
17. Кузьмин В.Р., Колодезников В.М., Новопапин М.Д. Анализ работоспособности авиационной техники в условиях Севера //Тез.докл. Всесоюзной научно-технической конференции "Надежность и долговечность машин и приборов" - Куйбышев: изд.Куйбышевского политехнического института. - 1984. - С. 129 - 130.
18. Кузьмин В.Р. Расчет хладостойкости элементов конструкций при циклических перегрузках. Сообщ. I. Расчет эффективных напряжений при упругопластическом деформировании металла.

- Киев: Редак. журн. Пробл. прочности. - 1985. - 15 с. - Рукопись деп. в ВИНТИ. - № 8692-В-85 Деп.
19. Кузьмин В.Р. Расчет хладостойкости элементов конструкций при циклических перегрузках. Сообщ. 2. Расчет показателей хладостойкости. - Киев: Редк. журн. Пробл. прочности, 1985. - 15 с. - Рукопись деп. в ВИНТИ № 8693-В85 Деп.
20. Кузьмин В.Р. Расчет уровня хладостойкости элементов конструкций // Прочность материалов и элементов конструкций в условиях низких температур. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1985. - С. 95 - 102.
21. Кузьмин В.Р. Статистическая оценка сопротивления хрупкому разрушению конструктивного элемента с трещиной при циклическом нагружении // Прочность конструкций, работающих в условиях низких температур. - М.: Металлургия, 1985. - С. 26 - 30.
22. Кузьмин В.Р. Вероятностно-статистическая оценка параметров роста усталостной трещины // Физ.-хим. механика материалов. - 1985. - № 4. - С. 76 - 79.
23. Ларионов В.П., Кузьмин В.Р. Прогнозирование надежности и долговечности сварных соединений с трещинообразными дефектами // Тез. доклада II Всесоюзного симпозиума по механике разрушения. - Киев: Наукова думка, 1985. - Т. III - С. 46- 47.
24. Кузьмин В.Р., Колмогорова И.М. Сопротивление материалов в условиях низких температур на Севере. Учебное пособие. - Якутск: Якутский госуниверситет, 1985. - 60 с.
25. Кузьмин В.Р. Расчет хладостойкости элементов конструкций. - Новосибирск: Наука, 1986. - 145 с.
26. Кузьмин В.Р., Прохоров В.А. Методика расчета эффективных напряжений при упругопластических деформациях // Машиноведение. - 1986. - № 1. - С. 66 - 70.
27. Кузьмин В.Р., Прохоров В.А. Вероятностный расчет долговечности элементов конструкций при циклическом упругопластическом деформировании // Тез. докл. V Всесоюзного симпозиума "Малоцикловая усталость - критерий разрушения и структура материалов", Часть I. - Волгоград: ИПО Машпром, 1987. - С. 174 - 176.
28. Прогнозирование хладостойкости деталей машин и элементов конструкций. Методические рекомендации // В.Р. Кузьмин, В.П. Ларионов, В.П. Гуляев, В.А. Прохоров. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1987. - С. 54.

29. Кононов В.Н., Кузьмин В.Р. Учет действительного состояния конструкций при расчете допускаемых размеров дефектов // Физико-механические аспекты работоспособности северной техники. - Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1987. - С: 56 - 64.
30. Кузьмин В.Р., Филиппов В.В., Варламов А.В. Оценка эксплуатационной надежности стальных бункеров по критериям усталостной прочности //Строительная механика и расчет сооружений. - 1990. - № 2. - С.18-21.

