

КОНТРОЛЬНЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР

На правах рукописи

Лядецкий Илья Александрович

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ
НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Магнитогорск,
2003

Работа выполнена на кафедре строительных конструкций
Магнитогорского государственного технического университета
им. Г. И. Носова

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Емельянов Олег Владимирович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Губайдулин Рафкат Галимович,

кандидат технических наук, доцент
Шувалов Александр Николаевич

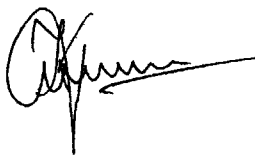
Ведущая организация – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

Защита состоится «17» декабря 2003 г. в «15⁰⁰» на заседании
диссертационного совета К 212.111.01 в Магнитогорском государст-
венном техническом университете им. Г. И. Носова по адресу: Маг-
нитогорск, пр. Ленина, 38, Малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «12» ноябре 2003г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук,
доцент



А.Л. Кришан

2003-А
18229

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В различных отраслях промышленности широко применяются сварные металлические конструкции (МК) и сооружения: подкрановые балки, мачты, башни, резервуары и т.д. При массовом изготовлении сварных МК наличие в них дефектов сварки в виде непроваров, подрезов, пор и др. практически неизбежно. При однократном нагружении подобные дефекты, как правило, не снижают несущей способности конструкции. При циклических же воздействиях (даже сравнительно низкого уровня) дефекты сварки трансформируются в усталостные трещины на ранней стадии эксплуатации конструкции. Время трансформации дефекта сварки в усталостную трещину составляет не более $10 \div 12$ % от общей долговечности конструкции, поэтому, ресурс конструкции в основном определяется временем подрастания усталостной трещины до некоторого критического размера, соответствующего моменту достижения одного из предельных состояний (разгерметизация резервуаров, недопустимое снижение несущей способности расчетного сечения вследствие ослабления его трещиной и др.).

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 и их дальнейшее развитие.

Метод расчета долговечности строительных конструкций, разработанный в ЦНИИПСКА им. Мельникова, основан на использовании линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, и при определении долговечности элементов конструкций не учитывает взаимодействие амплитуд разных уровней.

В связи с вышеизложенным, актуальной является проблема достоверной оценки долговечности конструкции при эксплуатационных воздействиях в случае наличия несовершенств и технологических дефектов. Определенные успехи в решении этой проблемы связаны с применением методов механики разрушения, позволяющих разрабатывать адекватные математические модели для описания процесса усталостного разрушения и на базе этих моделей выполнять расчетную оценку ресурса элементов конструкций и сооружений.

Цель работы. Разработка методики расчета долговечности элементов МК при наличии в расчетных сечениях исходных технологических дефектов и макротрещин, период подрастания которых до критических размеров определяет срок службы конструкции, с уче-

том влияния режима нагружения на их развитие.

Научную новизну работы составляют:

1) закономерности влияния пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при однократном и циклическом нагружениях, на величины максимального коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_{max} и размаха КИН ΔK ;

2) закономерности кинетики перераспределения перед фронтом трещины активных и остаточных сжимающих напряжений при различных режимах монотонного гармонического нагружения и перегрузках; закономерности влияния величины разгрузки после воздействия перегрузки на формирование остаточных сжимающих напряжений в окрестности вершины трещины и кинетику роста усталостных трещин (РУТ);

3) универсальная математическая модель РУТ, основанная на учете взаимодействия активных и остаточных напряжений перед фронтом трещины;

4) 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.

Практическую ценность работы представляет разработанная инженерная методика расчета усталостной долговечности элементов МК при наличии в расчетных сечениях исходных технологических дефектов, учитывающая влияние режима нагружения на процесс их развития.

Внедрение результатов. Настоящая работа выполнена в соответствии с грантом Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области архитектуры и строительных наук по теме «Прогнозирование надежности и долговечности металлических конструкций реконструируемых объектов». Методика расчета долговечности и надежности элементов циклически нагружаемых конструкций нашла практическое применение при прогнозировании срока службы конструкций и сооружений, обследуемых и проектируемых ОАО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ».

Апробация работы. Основные результаты работы были обсуждены и одобрены на 3 международных конференциях («Композиционные строительные материалы. Теория и практика», Пенза, 2001; «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения», Санкт-Петербург, 2001; «Надежность и долговечность строительных материалов и кон-

струкций», Волгоград, 2003), а также на 61-ой и 62-ой научно-технических конференциях (МГТУ, Магнитогорск, 2002, 2003).

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 214 страницах машинописного текста, включающего 100 рисунков, 11 таблиц, списка использованных источников из 140 наименований.

На защиту выносятся:

1) закономерности влияния пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при однократном и циклическом нагружениях, на величины максимального КИН K_{max} и размаха КИН ΔK ;

2) закономерности кинетики перераспределения перед фронтом трещины активных и остаточных сжимающих напряжений при различных режимах монотонного гармонического нагружения и перегрузках; закономерности влияния величины разгрузки после воздействия перегрузки на формирование остаточных сжимающих напряжений в окрестности вершины трещины и РУТ;

3) методика расчета функций распределения долговечности 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 многофункциональной модели кинетики РУТ.

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 исследований на основе анализа причин разрушения металлических конструкций и методов их расчета на усталость.

Показано, что очагами зарождения усталостных разрушений в сварных МК являются технологические дефекты в виде пор, непроваров, подрезов и др., расположенные в зонах конструктивной концентрации напряжений. При циклических воздействиях (даже сравнительно низкого уровня) дефекты сварки трансформируются в усталостные трещины на ранней стадии эксплуатации конструкции. Поэтому

му в запас прочности и долговечности целесообразно конструкции рассчитывать по стадии РУТ до достижения трещинами предельного размера.

Исследованию кинетики РУТ, анализу долговечности посвящены работы С.В. Серенсена, В.В. Болотина, В.П. Кагаева, Н.А. Махутова, Д.И. 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 др.

Накопленные экспериментальные данные и теоретические модели РУТ затрагивают в основном проблему влияния растягивающих перегрузок или снижения уровня циклической нагрузки на кинетику РУТ и хорошо описывают кинетику их развития в исследованиях, в рамках которых они были получены. Это связано с тем, что в настоящее время отсутствует математическая зависимость для описания кинетики РУТ при различных режимах монотонного гармонического нагружения справедливая в общем случае и имеющая под собой солидную физическую базу. Кроме того, ни одна из существующих моделей расчета развития трещины после воздействия перегрузки не позволяет учесть влияние величины разгрузки после воздействия перегрузки растяжением на величину задержки в развитии трещины. Между тем имеющиеся ограниченные данные, в основном феноменологического характера, показывают, что при одинаковом уровне перегрузки растяжением увеличение величины разгрузки после воздействия перегрузки вызывает снижение эффекта торможения роста трещины.

В связи с вышеизложенным для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1) изучить влияние пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при однократном и циклическом нагружениях, на величины максимального КИН и размаха КИН;

2) исследовать закономерности кинетики перераспределения напряжений в окрестности вершины трещины при различных режимах монотонного гармонического нагружения; разработать модель РУТ при монотонном гармоническом нагружении, учитывающую влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения;

3) исследовать закономерности влияния величин перегрузки и разгрузки после воздействия перегрузки на кинетику перераспределения активных и остаточных напряжений в окрестности вершины трещины и скорость РУТ в пределах зоны влияния перегрузки;

4) на базе анализа полученных экспериментальных данных раз-

работать методику вычисления скорости РУТ после воздействия перегрузки;

5) для конструкций, воспринимающих циклические воздействия, разработать методику расчета долговечности элементов сооружений, учитывающую наличие в расчетных сечениях исходных технологических дефектов сварки и влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения, перегрузки и величины разгрузки после воздействия перегрузки на развитие усталостных трещин.

Во второй главе изложены методики исследования напряженного состояния перед вершиной трещины при упругопластическом деформировании материала, определения КИН и проведения усталостных испытаний.

Изучение кинетики напряженного состояния материала в вершине трещины при различных режимах монотонного гармонического нагружения и после воздействия перегрузок выполняли методом конечных элементов (МКЭ). 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 малобазных 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.

Для получения количественных зависимостей, описывающих влияние режима нагружения на скорость роста усталостных трещин, проводились ресурсные испытания компактных внецентренно-растянутых образцов. Образцы были изготовлены из сталей ВСтЗсп и 09Г2С толщиной 12 мм. Нагружение образцов осуществлялось на универсальной испытательной машине ЦДМ Пу-10т. Частота нагружения составляла 10 Гц, коэффициент асимметрии цикла R при монотонном гармоническом нагружении варьировался в диапазоне от 0 до 0,8; уровни перегрузки для стали 09Г2С $(K_{max}^{ol} - K_{max}) / S_T = 0,718; 0,878; 1,028; 1,252; 1,436$; коэффициент асимметрии перегрузки $R_{ol} = 0,0334; 0,0377; 0,0438; 0,0457; 0,2667$; коэффициент асимметрии рабочего нагружения после воздействия перегрузок $R = 0,0625; 0,0714$; уровни перегрузки для стали ВСтЗсп $(K_{max}^{ol} - K_{max}) / S_T = 0,511; 1,518$; $R_{ol} = 0,0385; 0,05$; $R = 0,0625$.

В третьей главе изложены и проанализированы результаты экспериментального исследования кинетики НДС материала в окрестно-

сти вершины трещины при статическом и циклическом нагружениях, а также после воздействия перегрузок. Кроме этого, в этой главе приведены результаты экспериментального исследования кинетики РУТ при различных режимах монотонного гармонического нагружения и после воздействия перегрузки.

Монотонное гармоническое нагружение. На основании анализа результатов исследований кинетики НДС материала в вершине трещины установлено, что:

1) циклические пластические деформации материала, протекающие в вершине трещины, при значении $\Delta K_{ур} / S_T < 3,5$, не вызывают увеличения размаха КИН и максимального КИН по сравнению с упругим случаем, что позволяет использовать уравнения линейной упругой механики разрушения для их вычислений;

2) в полциклах разгрузки при относительной величине нагрузки $P / P_{max} = 0,54 \div 0,8$ в окрестности вершины трещины начинают формироваться остаточные сжимающие напряжения; при этом протекают два противоположных процесса – роста остаточных сжимающих напряжений по мере снижения нагрузки и снижения остаточных напряжений в результате перераспределения напряжений вследствие протекания циклических пластических деформаций;

3) для циклически стабильных сталей при толщине металлопроката до 30 мм отношение величины остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в вершине трещины в полциклах разгрузки, к размаху напряжений в вершине трещины инвариантно к марке стали, толщине металлопроката, величине максимального КИН и зависит только от величины коэффициента асимметрии цикла нагружения.

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

$$\Delta K_{eff} = U \times \Delta K, \quad (1)$$

где $U = 1 - |\Delta \sigma_{ост} / \Delta \sigma|$.

Зависимость между U и R путем регрессионного анализа экспериментальных данных была аппроксимирована выражением:

$$U = -3.1301 \times R^6 + 6.1548 \times R^5 - 2.5839 \times R^4 - 0.4271 \times R^3 + 0.5314 \times R^2 + 0.1571 \times R + 0.5686, \quad (2)$$

Для описания РУТ при гармоническом нагружении предложена зависимость:

$$dl/dN = C_{eff} (\Delta K_{eff})^n, \quad (3)$$

Достоверность предложенной модели РУТ подтверждается результатами обработки экспериментальных данных, полученных при испытаниях компактных образцов из сталей 09Г2С и ВСтЗсп в настоящем исследовании и исследованиях других авторов (рис. 1).

Гармоническое нагружение с растягивающей перегрузкой. Для оценки влияния величины перегрузки на эффект торможения роста трещины были выполнены исследования МКЭ кинетики НДС в вершине трещины при различных параметрах нагружения (рис. 2).

Установлено, что с увеличением уровня перегрузки возрастают величина и протяженность остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в окрестности вершине трещины при разгрузке. Суммирование остаточных напряжений с напряжениями от внешней нагрузки при рабочем уровне нагружения приводит к снижению действующих напряжений у вершины трещины и скорости ее развития.

Для циклически стабильных сталей при толщине металлопроката до 30 мм установленная зависимость между относительной величиной эффективного размаха КИН U_R^{ol} и уровнем перегрузки $(K_{max}^{ol} - K_{max}) / S_T$ непосредственно после воздействия перегрузки при $R_m = R_{ol}$ инвариантна к марке стали, толщине металлопроката и описывается выражением:

$$U_R^{ol} = -0.04248 \times \left(\frac{K_{max}^{ol} - K_{max}}{S_T} \right)^2 - 0.10748 \times \left(\frac{K_{max}^{ol} - K_{max}}{S_T} \right) + U_R, \quad (4)$$

где K_{max}^{ol} – максимальное значение КИН перегрузки; K_{max} – максимальное значение КИН рабочего нагружения; S_T – циклический предел текучести стали; U_R – относительная величина эффективного размаха КИН рабочего нагружения.

На основании анализа результатов развития усталостных трещин после воздействия перегрузок при испытаниях лабораторных образцов установлены три участка в развитии трещины в зоне задержки трещины (рис. 3): на 1-ом участке (непосредственно после воздействия перегрузки), происходит замедление скорости РУТ; на 2-ом участке трещина развивается с постоянной скоростью; на 3-ем участке развитие трещины ускоряется и в конце зоны влияния перегрузки ее скорость достигает скорости роста трещины при постоянной амплитуде нагружения в случае отсутствия перегрузки.

Для испытанных образцов протяженности зоны задержки в развитии трещины, участков замедления и ускорения хорошо совпадают с размерами зон, вычисленными по формулам:

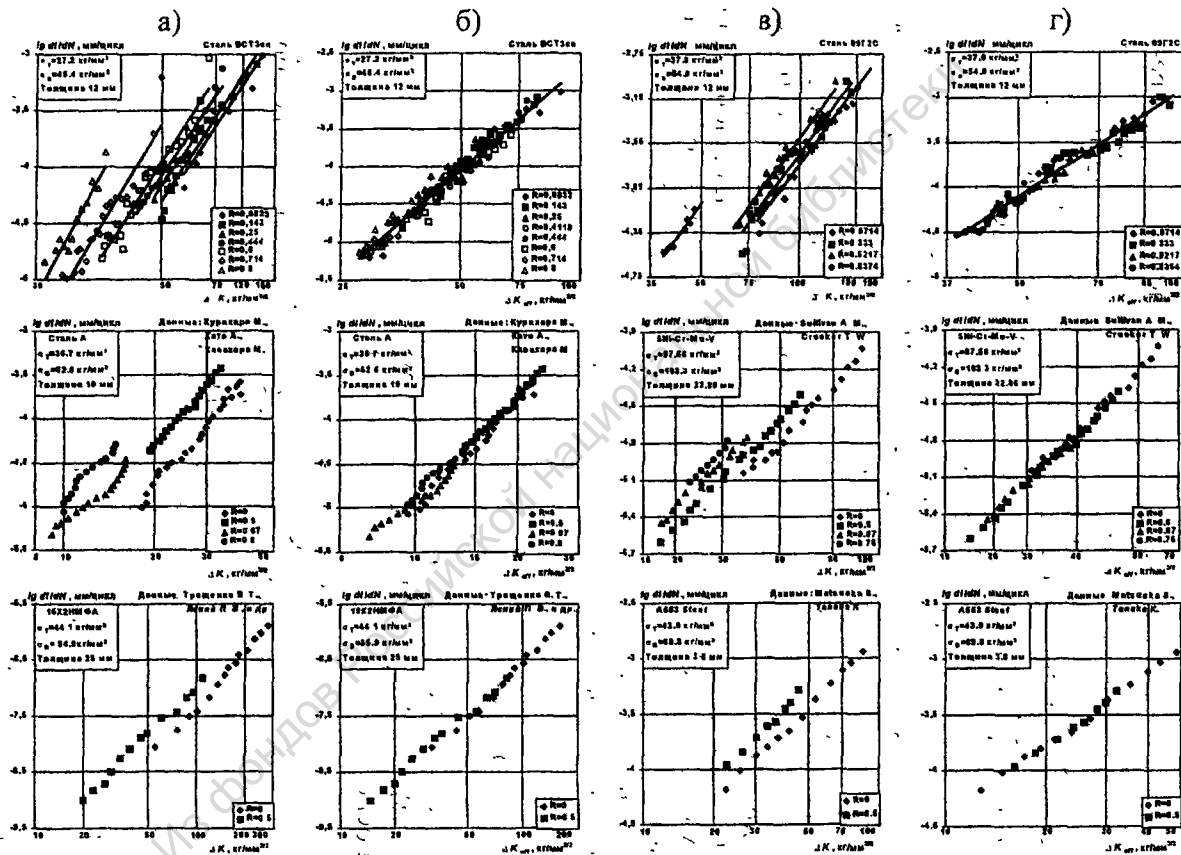


Рис. 1. Диаграммы усталостного разрушения:

а), в) – уравнение Пэриса; б), г) – предлагаемая зависимость

$$r_M^T = \frac{K_{\max}^2}{2\pi \times \sigma_T^2}, \quad (5)$$

$$r_T^{\text{зам, уск}} = \frac{\Delta K^2}{2\pi \times S_T^2}, \quad (6)$$

Используя метод К — калибровки при анализе развития трещины в зоне задержки были установлены закономерности изменения относительной величины эффективного размаха КИН U в пределах зоны задержки трещины (рис. 4):

— участок замедленного роста усталостной трещины

$$U = U_1 - (U_1 - U_2) \times \left(\frac{r}{\Delta r_{\text{зам}}} \right)^s, \quad (7)$$

— участок ускоренного роста усталостной трещины

$$U = U_3 + (U_{\text{экс}} - U_3) \times \left(\frac{r}{\Delta r_{\text{уск}}} \right)^k, \quad (9)$$

$$\text{где } U_1 = \frac{P_{\max}^{\text{ол}}}{P_{\text{экс}}} \times U_0^{\text{ол}} \leq 1, \quad (10)$$

$P_{\max}^{\text{ол}}$ — максимальное значение перегрузки; $P_{\text{экс}}$ — максимальное значение нагрузки следующего после перегрузки рабочего нагружения; $U_0^{\text{ол}}$ — относительная величина эффективного размаха КИН перегрузки, определяется по формуле (2); r — положение вершины трещины в пределах циклической пластической зоны; $\Delta r_{\text{уск}}$, $\Delta r_{\text{зам}}$ — размеры участков ускоренного и замедленного развития трещины;

$$U_3 = \frac{\Delta K_{\text{эфф}2}}{\Delta K_3}, \quad (11)$$

где

$$\Delta K_3 = \sqrt{(l_{\text{пер}} + r_{\text{м}} - l_{\text{тек}}) \times 2 \times \pi \times S_T^2}$$

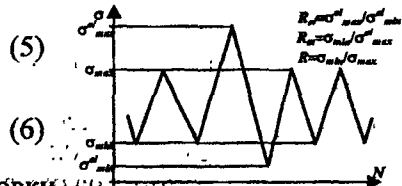


Рис. 2. Схема режима нагружения

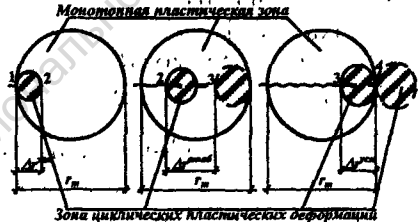
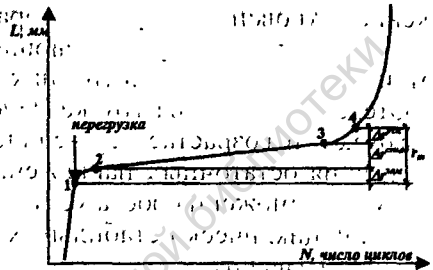


Рис. 3. Схемы поясняющие эффект задержки развития усталостной трещины после воздействия перегрузки

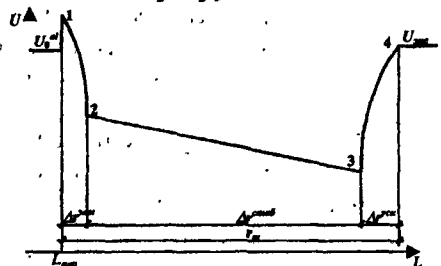


Рис. 4. Схема изменение параметра U в пределах зоны задержки

при этом должно выполняться условие $l_{пер} + r_m = l_{мех} + \frac{\Delta K_3^2}{2 \times \pi \times S_T^2}$;

Для исследованных сталей и указанных условий испытания образцов $S = 3$, а параметр $k = 0,5$.

Влияние величины разгрузки после воздействия перегрузки на кинетику РУТ.

Установлено, что при одинаковых величинах перегрузок растяжением уровень снижения образующихся в окрестности вершины трещины остаточных сжимающих напряжений существенно зависит от интенсивности развития циклических пластических деформаций, протекающих при разгрузке непосредственно после воздействия перегрузки, и возрастает с увеличением величины разгрузки. По мере снижения остаточных напряжений уменьшается обусловленный ими эффект торможения роста усталостной трещины.

Для циклически стабильных сталей при толщине металлопроката до 30 мм зависимость между относительной величиной эффективного размаха КИН $U_{R(R_m \neq R_{ol})}^{ol}$ непосредственно после воздействия перегрузки и разностью $(R_m - R_{ol})$ была аппроксимирована выражениями:

$$U_{R(R_m \neq R_{ol})}^{ol} = (0.4862 \times (R_m - R_{ol}) + 1) \times U_R^{ol} \quad \text{при } (R_m - R_{ol}) < 0, \quad (12)$$

$$U_{R(R_m \neq R_{ol})}^{ol} = (0.2856 \times (R_m - R_{ol}) + 1) \times U_R^{ol} \quad \text{при } (R_m - R_{ol}) > 0, \quad (13)$$

где U_R^{ol} — относительная величина эффективного размаха КИН при $R_m = R_{ol}$, определяемая по формуле (4).

Таким образом, в рамках единой физической концепции РУТ с позиции взаимодействия остаточных сжимающих напряжений перед фронтом трещины с напряжениями от внешней нагрузки объяснены влияние асимметрий циклического нагружения, влияние перегрузки и величины разгрузки после воздействия перегрузки на процесс РУТ.

Достоверность предложенной модели РУТ подтверждена проведением ресурсных испытаний образцов, обработкой результатов усталостных испытаний образцов и натуральных узлов выполненных в других исследованиях.

В четвертой главе приведена методика оценки усталостной долговечности элементов МК на стадии РУТ.

Функция распределения долговечности расчетного сечения вычисляется методом статистического моделирования (методом Монте-Карло).

Алгоритм расчета:

1. Реальный эксплуатационный процесс нагружения заменяют блочным, используя два подхода. Первый подход — функции распре-

деления двух случайных величин – амплитуды σ_a и среднего напряжения цикла σ_m (полученных одним из методов, изложенных в ГОСТ 25.101. – 83) заменяют ступенчатой линией, которая в графической форме представляет собой блок нагружения. Второй подход заключается в том, что если весь процесс нагружения разбить на различные интервалы времени, во время которых статистические характеристики процесса нагружения (математическое ожидание и дисперсия напряжений) не изменяется, то весь процесс нагружения можно представить в виде суммы узкополосных квазистационарных процессов, каждый из которых будет иметь свои статистические параметры.

Согласно [А.Б. Злочевский, В.С. Шапкин], если схематизируемый процесс нагружения является узкополосным, то в качестве базового равноповреждающего процесса принимается гармонический процесс, эквивалентный случайному по статистическим характеристикам. При этом средние значения гармонического σ_{Hcp} и случайного M_{σ_H} процессов равны, а статистически эквивалентная амплитуда гармонического воздействия равна:

$$\sigma_{a,экс} = \sqrt{2 \times D_{\sigma_H}} \quad (8)$$

где D_{σ_H} – дисперсия номинальных напряжений исходного процесса $\sigma_H(\tau)$.

2. Определяется число циклов нагружения $(\sigma_{ai} + \sigma_{mi})$, соответствующее i -ой ступени.

3. С помощью стандартной программы генератора равномерно распределенных чисел моделируются две случайные величины: номер ступени нагружения, число циклов ступени n_j ($n_j < n_{общ\ ст.}$).

4. Решается задача о приращении трещины в течении n_j циклов с учетом взаимодействия циклов различного уровня. При этом в качестве критерия разрушения элемента конструкции принимается условие достижения усталостной трещиной предельного размера, определяемого из возможных предельных состояний сечения.

5. После завершения заданного числа статистических моделирований, полученный массив значений долговечности подвергается статистической обработке, по результатам которой строятся функции распределения ресурса $F(N_D)$ и функция надежности $H(N_D)$ расчетного сечения для данных элементов МК.

Третий, четвертый и пятый пункты в настоящей работе реализованы с помощью программы «Прогноз».

На рис. 5 приведен результат расчета функции распределения усталостной долговечности и надежности монтажного болто-сварного

соединения на отметке 25 м решетчатой радиорелейной башни высотой 180 м. Число испытаний было принято равным 1000, т.к. при его увеличении результаты расчета изменялись не более чем на 2...3 %.

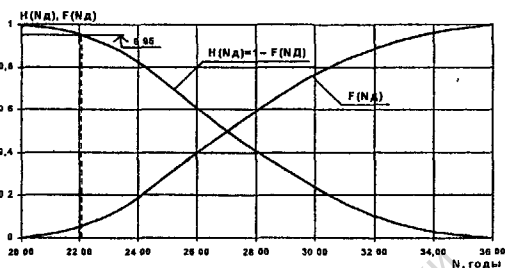


Рис.5.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выявлены закономерности перераспределения активных и остаточных напряжений в окрестности вершины трещины при различных режимах монотонного гармонического нагружения. С позиции взаимодействия остаточных напряжений, формирующихся в окрестности вершины трещины в процессе разгрузки, с напряжениями от внешней нагрузки объяснено влияние асимметрии цикла нагружения на скорость роста трещины. Установлено, что для циклически стабильных сталей при толщине металлопроката до 30 мм отношение величины остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в вершине трещины в полциклах разгрузки, к размаху напряжений в указанной точке в полцикле нагружения инвариантно к марке стали, толщине металлопроката, величине максимального КИН и зависит только от величины коэффициента асимметрии цикла нагружения.

2. Изучены закономерности перераспределения напряжений в окрестности вершины трещины при воздействии интенсивных перегрузок и последующем переменном нагружении. Установлено, что растягивающие перегрузки приводят к формированию в указанной области стабильных сжимающих напряжений и значительному повышению ресурса на стадии роста трещины; для циклически стабильных сталей при толщине металлопроката до 30 мм зависимости относительной величины эффективного размаха КИН U от уровня перегрузки $(K_{max}^{ol} - K_{max})/S_T$ при различных значениях коэффициентов асимметрии цикла перегрузки инвариантны к марке стали, толщине металлопроката. Чем больше уровень перегрузки, тем меньше относительная величина эффективного размаха КИН.

3. При одинаковых величинах перегрузок растяжением уровень снижения образующихся в окрестности вершины трещины остаточных сжимающих напряжений существенно зависит от интенсивности

развития циклических пластических деформаций, протекающих при разгрузке непосредственно после воздействия перегрузки, и возрастает с увеличением величины разгрузки. По мере снижения остаточных напряжений уменьшается обусловленный ими эффект торможения развития трещины. Установлены закономерности влияния величины разгрузки после воздействия перегрузки на эффективную величину номинального размаха КИН.

4. На основании анализа результатов развития усталостных трещин после воздействия перегрузок при испытаниях лабораторных образцов установлены:

– три характерных участка в развитии трещины в пределах зоны задержки – на 1-ом участке (непосредственно после воздействия перегрузки), происходит замедление скорости роста трещины; на 2-ом участке трещина развивается с постоянной скоростью; на 3-ем участке развитие трещины ускоряется и в конце зоны влияния перегрузки ее скорость достигает скорости роста трещины при постоянной амплитуде нагружения в случае отсутствия перегрузки. Размеры участков замедления и ускорения усталостной трещины в пределах зоны перегрузки хорошо совпадают с размерами зон циклических пластических деформации;

– закономерности изменения фактических значений относительной величины эффективного размаха КИН в пределах зоны задержки.

5. Разработанная математическая модель роста трещины, позволяет учитывать влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения, воздействие перегрузки растяжением, влияние величины разгрузки после воздействия перегрузки на изменение скорости роста трещины. Применение предложенной методики при обработке экспериментальных данных позволило получить параметры сопротивления материала развитию трещины, не зависящие от параметров внешней нагрузки.

6. Для конструкций, воспринимающих циклические воздействия, разработана методика расчета функций распределения долговечности 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 многофункциональной модели кинетики усталостного роста трещины, учитывающей влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения, воздействия растягивающих перегрузок и величины разгрузки после воздействия перегрузки.

Основные положения и результаты диссертаций опубликованы в следующих работах:

1. Емельянов О. В., Лядецкий И. А. Методологический подход к прогнозированию кинетики усталостного разрушения металлов // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. I. – Пенза. – 2001. – С. 104 – 106.
2. Емельянов О. В., Лядецкий И. А. Влияние асимметрии цикла нагружения на кинетику роста усталостных трещин // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения. Труды IV – ой Междунар. конф. СПб.: «Нестор», 2001. – С. 115 – 119.
3. Емельянов О. В., Лядецкий И. А. Модель роста усталостной трещины при стабильном гармоническом нагружении // Строительство и образование: Сб. науч. тр. Вып. 5 – Екатеринбург, УГТУ – УПИ, – 2002. – С. 133 – 135.
4. Емельянов О. В., Лядецкий И. А. Определение характеристик сопротивления стали развитию трещин при циклическом изменении нагрузки // Строительные материалы и изделия. Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск. – 2002. – С. 300 – 308.
5. Емельянов О. В., Лядецкий И. А. Влияние пластических деформаций в вершине трещины на величину коэффициента интенсивности напряжений // Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций: III Междунар. науч.-техн. конф. Волгоград. – 2003. – С. 22 – 24.
6. Лядецкий И. А. Влияние режима нагружения на усталостную долговечность элементов металлоконструкций // 62 науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2002 – 2003 гг.: Тез. докл. науч. техн. конф. Магнитогорск: МГТУ. – 2003, С. 27 – 30.
7. Емельянов О.В., Лядецкий И.А Влияние уровня перегрузки на скорость развития усталостных трещин. Деп. в ВИНТИ 07.10.03 №1779 – В2003.
8. Емельянов О.В., Лядецкий И.А Влияние величины разгрузки после воздействия перегрузки на кинетику роста усталостных трещин. Деп. в ВИНТИ 07.10.03 №1778 – В2003.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Подписано в печать 5.11.03.

Формат 60x84 1/16.

Бумага тип.№ 1.

Плоская печать.

Усл.печ.л.1,0.

Тираж 100 экз.

Заказ 820.

455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Полиграфический участок МГТУ

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

2003-A
18229

№ 18229

Из фондов Российской национальной библиотеки