

На правах рукописи



Нигматуллин Владимир Игоревич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЦИКЛИЧЕСКИХ И
СТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С
УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОСТРОЕЧНЫХ
ОПЕРАЦИЙ И ВОЗМОЖНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ
КОРПУСОВ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.08.01 - Теория корабля и строительная механика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт - Петербург

2014

Работа выполнена в ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр» **Палий Олег Маркович**

Официальные оппоненты:

Ильин Алексей Витальевич, доктор технических наук, ФГУП «ЦНИИ КМ Прометей», заместитель начальника НПК - 3, начальник 34 лаборатории.

Семенов Артем Семенович, кандидат физико - математических наук, доцент, Санкт - Петербургский государственный политехнический университет, кафедра прикладной механики и процессов управления.

Ведущая организация: Санкт - Петербургский государственный морской технический университет.

Защита состоится _____ в _____
на заседании ученого совета Д.411.004.01 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу СПб, Московское шоссе д.44

С диссертацией можно ознакомиться в научно - технической библиотеке ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и на сайте www.krylov-center.ru

Автореферат разослан _____

Отзывы просим направлять в 2-х экземплярах по адресу:
по почте - 196158, г. Санкт - Петербург, Московское шоссе, д. 44, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Л.И. Вишневский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Прочность и надежность конструкций корпусов подводных объектов в значительной степени определяется механическими свойствами используемых материалов и особенностями принятых технологических процессов. Эти процессы могут оказывать отрицательное воздействие на поведение конструкций как непосредственно, (появление дефектов, полей остаточных напряжений) так и путем изменения механических свойств материала. Внедрение в судостроение новых корпусных материалов и технологических процессов, таких как глубокое пластическое деформирование «в холодную», экспандирование труб, вызывает необходимость изучения влияния этих процессов на свойства материалов и, как следствие, на прочность конструкции.

Не менее важной для обеспечения прочности и работоспособности корпуса является проблема детального учета и оценки характера эксплуатации его конструкций в отношении переменности нагрузок.

Хотя оба этих направления работ были в поле внимания специалистов в области прочности конструкций, степень проработанности отмеченных вопросов нельзя признать удовлетворительной. Так, например, не подвергались подробному анализу такие вопросы, как роль эффекта Баушингера, асимметрии цикла нагружения в районах возможных дефектов конструкции, влияние остаточных сварочных напряжений и ряд других.

В предлагаемой диссертационной работе проанализированы основные из отмеченных факторов. Показано, что кинетика роста трещин в конструкции по - разному зависит от коэффициента асимметрии цикла по внешней нагрузке R_p и от коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины R_{K_1} , учитывающего наличие остаточных сварочных напряжений в конструкции. Установлено существенное влияние коэффициента асимметрии цикла на кинетику роста усталостной трещины, а также рассмотрено влияние эффекта Баушингера на устойчивость цилиндрических оболочек и подводных трубопроводов. Предложено аналитически получать критическое значение коэф-

фициента интенсивности напряжений K_{Ic} по результатам испытаний при различных коэффициентах асимметрии цикла R_p .

Сформулированы принципы учета проанализированных параметров при нормировании прочности конструкций. Указаны возможные регламентации параметров технологических процессов холодного формирования конструкций, исходя из условий обеспечения необходимого запаса прочности.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Совершенствование методов оценки прочности и работоспособности конструкций корпусов подводной техники на основе:

- уточнения прогнозирования малоциклового усталостного повреждения материалов с учетом особенностей их нагружения в конструкции и влияния сварочных напряжений;
- учета изменения основных характеристик механических свойств материалов под воздействием технологических процессов;
- создания новых методов экспериментальной оценки свойств материалов, учитывающих отмеченные особенности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе используются известные и разработанные автором экспериментальные методы исследования поведения материалов и конструкций в различных условиях нагружения, теоретические методы обработки результатов испытаний и методы механики твердого деформируемого тела.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Научная новизна работы состоит:

в построении уточненных методов оценки модели распространения усталостной трещины в материале конструкции при различных условиях эксплуатации объекта с учетом наличия в конструкции начальных технологических напряжений и в оценке влияния отдельных технологических операций на изменение основных свойств материалов и прочности конструкций.

ДОСТОВЕРНОСТЬ

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием основных положений механики деформируемого твердого тела и механики разрушения. Кроме того, достоверность обеспечивается получением корректных данных экспериментальных исследований и проведением сопоставлений результатов с данными, полученными ранее другими авторами.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

– результаты диссертационной работы позволяют корректно оценить циклическую трещиностойкость металлов в составе конструкций и учесть в расчетах прочности подводных объектов изменение их свойств при технологических операциях;

– использование полученных результатов позволит произвести обоснованную корректировку предельно допустимых уровней напряжений, количества циклов нагружения и периодичности осмотров конструкции;

– разработанные процедуры позволят усовершенствовать методы аттестации прочности и работоспособности металлических корпусных материалов в отношении их технологической переработки и условий эксплуатации.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Реализацией работы являются разработанные на основе полученных теоретических и экспериментальных данных методики ИМЯН 32-372-10 МИ «Металлические материалы. Испытания при циклическом нагружении. Методика оценки циклической трещиностойкости», программа автоматической обработки результатов испытаний на кинетику роста усталостной трещины ИМЯН. 0302. 01 – 01 «CRACK_CYCLE» и методика ИМЯН 32-407-14 МИ «Металлические материалы. Испытания при статическом нагружении. Оценка влияния предварительного пластического деформирования на упруго-пластические свойства материала. Методика».

Результаты проведенных в данной работе теоретических и экспериментальных исследований вошли в научно - технические отчеты по темам «Ма-

гистраль», «Порошок», «Перспектива - 3», «Корпус 949 АМ-ОКК-К», «Эффективность», «Оболочка - К», «Барьер - К» и «Приемка».

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- конференция по строительной механике корабля памяти академика Ю. А. Шиманского, 2008 г.;

-VI международная конференция «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях», 2011 г.;

- конференция по строительной механике корабля памяти академика Ю. А. Шиманского, 2011 г.;

- конференция по строительной механике корабля памяти академика П. Ф. Папковича, 2012 г.

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ и 1 электронное издание, из которых 5 опубликованы в изданиях, определяемым Перечнем ВАК, где доля автора составляет 100% в 2 работах и 50% в 3 работах.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертация содержит титульный лист, оглавление, введение, три главы основного текста, заключение, список использованных источников из 38 наименований, три приложения; изложена на 97 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 6 таблиц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

На основе выполненных экспериментальных исследований выносятся на защиту:

1 Выявленные в процессе экспериментальных исследований ранее неизвестные особенности поведения материала при циклических нагружениях в области предопасных состояний (влияние асимметрии цикла, затормаживание и остановка роста трещины при переходе в область повышенных сжимающих напряжений);

2 Уточненные математические модели распространения усталостной трещины, позволяющие учесть влияние асимметрии цикла, в частности, оценить влияние знака напряжения (растяжение - сжатие) и определить критическое значение коэффициента интенсивности напряжений.

3 Методы экспериментальной оценки циклической трещиностойкости при наличии остаточных сварочных напряжений и способы оценки влияния остаточных сварочных напряжений на циклическую трещиностойкость элементов конструкции.

4 Методы количественной оценки изменений упруго - пластических свойств металлов при технологических операциях.

5 Метод приближенной оценки влияния предварительного технологического пластического деформирования материала (эффект Баушингера) на устойчивость круговых цилиндрических оболочек, необходимый для аттестации корпусных материалов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы цели исследования, приведен краткий обзор существующих методов оценки трещиностойкости металлических материалов, работающих в условиях знакопеременных, статических и циклических нагрузений. Обоснована актуальность поставленной задачи, указано, что результаты диссертационной работы предоставляют специалисту по прочности конструкций новую информацию, необходимую для определения циклической долговечности сварных соединений и элементов конструкций прочного корпуса. Сформулированы результаты, обладающие научной новизной, приведены обоснования достоверности научных положений и выводов и указана практическая ценность работы.

В **первой главе** диссертационной работы представлены результаты экспериментального исследования циклической трещиностойкости металлических конструкционных материалов и разработанные на их основе методы экспериментальной и теоретической оценки циклических и статических

свойств материала в широком диапазоне изменения условий нагружения, включая предкритическую стадию нестабильного распространения трещины.

В §1 дан обзор современного состояния изучаемой проблемы. В рамках линейной и упруго - пластической механики разрушения основными определяющими параметрами являются размах коэффициента интенсивности в вершине трещины ΔK_I , коэффициент асимметрии цикла по нагрузке $R_P = P_{\min}/P_{\max}$, (отношение минимальной и максимальной нагрузок цикла с учетом знака), и коэффициент асимметрии по коэффициенту интенсивности напряжений $R_{K_I} = K_{I\min}/K_{I\max}$, (отношение минимального и максимального коэффициентов интенсивности в вершине трещины с учетом знака). Коэффициент асимметрии по нагрузке R_P может принимать любое значение $-\infty < R_P < +\infty$; при этом $0 \leq R_P < 1$, если все нагружение происходит в области растяжения; $R_P < 0$, если минимальная и максимальная нагрузки имеют разные знаки; $R_P > 1$, если все нагружение происходит в области сжатия. Коэффициенты интенсивности напряжений в вершине трещины $K_{I\min}$ и $K_{I\max}$ для конкретной геометрии элемента конструкции, заданной внешней нагрузкой и остаточных сварочных напряжений рассчитываются с помощью аппарата линейной или упруго - пластической механики разрушения. Для них определяется коэффициент асимметрии по коэффициенту интенсивности напряжений R_{K_I} .

Полная усталостная кривая обычно строится в двойных логарифмических координатах и представляет собой монотонно возрастающую S-образную кривую, ограниченную вертикальными асимптотами (рис. 1). Эти асимптоты соответствуют размаху порогового значения коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} (threshold — пороговый) (порог усталости), ниже которого трещина не растет, и критическому его значению, при достижении которого наступает неустойчивый рост трещины.

В известных публикациях (О. Восиковский, М. Миллер, Р. Ритчи, А. Охта и др.) рассматривается только влияние коэффициента R_p . Установлено, что зависимость скорости роста трещины от коэффициента асимметрии различна для разных материалов. Влияние асимметрии усиливается по мере увеличения статической прочности материалов, причем наибольшее увеличение роста скорости усталостной трещины с ростом коэффициента асимметрии имеет место на начальной и предкритической стадии (области А и С на рис. 1).

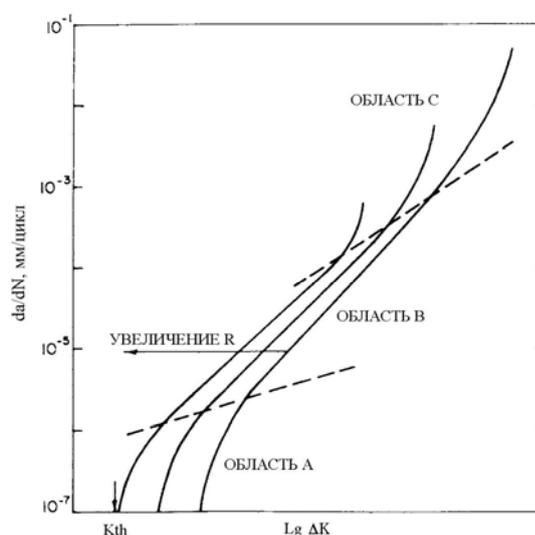


Рисунок 1 - Влияние асимметрии цикла на циклическую трещиностойкость металлов

Задачей экспериментального и теоретического исследования скорости роста усталостной трещины при заданных значениях минимальной и максимальной нагрузки цикла является построение зависимости

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_I, R_{K_I}), \quad (1)$$

где $\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min}$; $K_{I\max}$, $K_{I\min}$ изменяются в процессе роста усталостной трещины. Эти параметры определяются расчетом и зависят от геометрии элемента конструкции и трещины, внешней нагрузки и остаточных сварочных напряжений (глава 2). Функция $f(\Delta K_I, R_{K_I})$ является механической характеристикой материала и определяется экспериментально.

Экспериментальные исследования влияния величины коэффициента асимметрии цикла на втором участке усталостной кривой показывают, что при положительных значениях $R_p < 0,5$ это влияние мало заметно, но при $R_p > 0,5$ и при отрицательных R_p оно становится существенным. Так, в Британском стандарте BS 7910 данные для параметров, входящих в (1), приводятся отдельно для $R_p < 0,5$ и $R_p > 0,5$, причем при переходе от первого диапазона ко второму скорость роста усталостной трещины возрастает вдвое. В стандарте DNV рассматривается отдельно рост усталостной трещины при растягивающих ($0 \leq R_p < 1$) и при знакопеременных ($R_p < 0$) нагрузках.

Исследования Г. Бута и С. Меддокса показали, что проблема оценки эффективной величины ΔK_I требует учета эффекта закрытия трещины. Экспериментальные результаты, полученные в этой работе, показали, что в процессе циклического нагружения трещина остается закрытой на некоторой части цикла. Это явление имеет место не только при отрицательных значениях R_p , но и для циклов, полностью действующих в области растяжения при условии $R_p < 0,5$. Авторы указывают, что проблема требует дальнейших исследований.

В расчетах циклической трещиностойкости в современных методиках ASME, DNV в зависимости от уровня внешней нагрузки предусмотрены различные варианты учета параметра R_{K_I} : при низких уровнях сжимающих нагрузок принимается $K_{I\min} = 0$, то есть в размах коэффициента интенсивности напряжений включается только положительная составляющая, а при высоких уровнях сжимающих нагрузок учитывается $K_{I\min} < 0$. Исследование роста усталостной трещины при условии $R_p > 1$, когда нагружение полностью происходит в области сжатия, не представлено в литературе ни на одном из участков диаграммы усталостного разрушения.

Проблема влияния асимметрии цикла приобретает особое значение, если трещина расположена в той части конструкции, где имеются остаточные сварочные напряжения. Если, например, при растягивающих сварочных на-

пряжениях в конструкции к ней приложена внешняя сжимающая нагрузка, то в ненагруженном состоянии в вершине трещины $K_{I\max} > 0$, а после приложения нагрузки в вершине трещины реализуется $K_{I\min}$, зависящее от величины сжимающей нагрузки. Очевидно, что в такой ситуации учет асимметрии коэффициента интенсивности при расчете роста усталостной трещины имеет принципиальное значение. Рост усталостной трещины при наличии сварочных напряжений рассмотрен в работе Г. Серветти и З. Цанга, где получены частные эмпирические соотношения.

Таким образом, на основе анализа показано, что в отношении усталостного разрушения наименее исследован экспериментально третий участок усталостной диаграммы, соответствующий количеству циклов до разрушения $10^3 \div 10^4$, представляющий большой практический интерес. Трудности экспериментального исследования этого участка связаны с большой скоростью распространения усталостной трещины и необходимостью работать при максимальных значениях коэффициента интенсивности напряжений, близких к критическому значению. Соответственно, влияние асимметрии цикла, эффект закрытия трещины и эффект сжимающих напряжений на третьем участке усталостной кривой требуют экспериментального и теоретического исследования. Эта область важна для оценки сроков межремонтных периодов и вывода конструкции из эксплуатации.

В §2 дано описание испытательного оборудования, измерительных устройств и образцов. Испытания проводились на универсальной сервогидравлической испытательной машине «Инстрон-1255» (Англия) и универсальной сервогидравлической испытательной машине с программным управлением «Инстрон-8804». Нагружение производилось по схеме трехточечного изгиба в режиме управления по нагрузке. В процессе испытаний образца периодически производилась дискретная запись диаграммы «нагрузка – раскрытие трещины». Глубина трещины a определялась методом упругой податливости образца в соответствии с соотношениями линейной механики разрушения. Расчет скорости роста усталостной трещины da/dN произво-

дился через заданный интервал приращения глубины трещины; рассматривались интервалы приращения 0,1 мм; 0,2 мм; 0,5 мм; 1,0 мм; 2,0 мм. С увеличением интервала приращения глубины трещины уменьшается разброс экспериментальных точек на диаграмме $da/dN - \Delta K_I$, но уменьшается и количество точек. При высоте образца порядка 50 мм оптимальным представляется интервал приращения глубины трещины 0,5 мм. Каждому приращению глубины трещины соотносилось полученное экспериментально количество циклов.

Для обработки полученных данных на компьютере автором разработана программа CRACK_CYCLE, обладающая рядом возможностей:

- программа автоматически выделяет в записанном файле диаграмму нагрузки или разгрузки, и на ней участок заданной величины и расположения, необходимый для определения глубины трещины;
- программа автоматически располагает файлы в последовательном порядке и выделяет номера циклов, соответствующих заданному шагу приращения глубины трещины; полученные массивы значений da/dN и ΔK_I обрабатываются по методу наименьших квадратов в двойных логарифмических координатах.

После достижения глубиной трещины величины равной 0,6 ширины образца циклические испытания прекращались и производился статический долом образца с целью оценки прямолинейности фронта и равномерности распространения усталостной трещины по толщине образца.

В §3 представлены результаты экспериментального исследования сталей с пределом текучести $\sigma_{0,2}$ в диапазоне 600 ÷ 1100 МПа при циклическом нагружении; образцы были изготовлены из основного металла, испытания проводились в условиях трехточечного изгиба. В этом случае имеют место соотношения $0 < R_p < 1$ и $0 < R_{K_I} < 1$. Впервые эти материалы испытаны на третьем участке диаграммы усталостного разрушения, где значение $K_{I\max}$ приближается к критическому значению K_{Ic} .

В §4 разработан новый метод определения критического значения коэффициента интенсивности напряжений. Произведен анализ возможностей использования для оценки скорости роста усталостной трещины двух наиболее известных критериев (П. Париса и Р. Формена). Показана ограниченность возможностей первого из них.

В диссертационной работе автором предлагается оценивать скорость роста усталостной трещины с учетом коэффициента асимметрии цикла R_{K_I} и критического значения коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} с помощью критерия Р.Формена, позволяющего учесть влияние асимметрии цикла по коэффициенту интенсивности напряжений:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_F(\Delta K_I)^{m_F}}{K_{Ic}(1 - R_{K_I}) - \Delta K_I} = \frac{C_F(\Delta K_I)^{m_1}}{\frac{K_{Ic}}{K_{I\max}} - 1}, \quad m_1 = m_F - 1. \quad (2)$$

Как видно из формулы (2), учет влияния коэффициента асимметрии R_{K_I} эквивалентен учету влияния максимального значения коэффициента интенсивности напряжений $K_{I\max}$ в цикле; при приближении его значения к критическому скорость роста трещины неограниченно увеличивается.

В диссертационной работе предложены два варианта процедуры определения постоянных, входящих в соотношение Р. Формена, при обработке экспериментальных данных.

В первом варианте предполагается известным критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} и необходимо определить два параметра C_F и m_F .

Для каждой экспериментальной точки существует набор значений $(\Delta K_I)_i$, $\left(\frac{da}{dN}\right)_i$ и R_{K_i} . Требуется найти значения C_F и m_F , позволяющие наилучшим образом удовлетворить соотношениям

$$\left\{ \left[K_{Ic}(1 - R_{K_i}) - \Delta K_I \right] \frac{da}{dN} \right\}_i = C_F(\Delta K_I)_i^{m_F},$$

(i – номер экспериментального измерения скорости роста усталостной трещины; i изменяется от 1 до общего числа экспериментальных точек n).

Использование метода наименьших квадратов приводит к линейной системе уравнений для определения постоянных C_F и m_F :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left\{ \lg \left[K_{Ic} (1 - R_{K_i}) - \Delta K_I \right] \frac{da}{dN} - \lg C_F - m_F \lg \Delta K_I \right\} = 0; \\ \sum_{i=1}^n \left\{ \left(\lg \left[K_{Ic} (1 - R_{K_i}) - \Delta K_I \right] \frac{da}{dN} - \lg C_F - m_F \lg \Delta K_I \right) \lg \Delta K_I \right\} = 0; \end{cases} \quad (3)$$

(под знаком суммы величины $\frac{da}{dN}$, ΔK_I и R_{K_i} имеют индекс i).

Во втором варианте обработки экспериментальных данных величина критического значения коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} предполагается неизвестной и необходимо определить три параметра C_F , m_F и K_{Ic} . Аналогичный подход приводит к системе трех уравнений:

$$\begin{cases} n \lg C_F + m_1 \sum_{i=1}^n \lg \Delta K_I = \sum_{i=1}^n \lg \left[\frac{da}{dN} \left(\frac{K_{Ic}}{K_{I\max}} - 1 \right) \right]; \\ \lg C_F \sum_{i=1}^n \lg \Delta K_I + m_1 \sum_{i=1}^n (\lg \Delta K_I)^2 = \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{da}{dN} \left(\frac{K_{Ic}}{K_{I\max}} - 1 \right) \right) \lg \Delta K_I \right]; \\ \lg C_F \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{Ic} - K_{I\max}} + m_1 \sum_{i=1}^n \left[\lg \Delta K_I \cdot \frac{1}{K_{Ic} - K_{I\max}} \right] = \\ \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{da}{dN} \left(\frac{K_{Ic}}{K_{I\max}} - 1 \right) \right) \frac{1}{K_{Ic} - K_{I\max}} \right]. \end{cases} \quad (4)$$

Эта система уравнений относительно $\lg C_F$, m_1 и K_{Ic} решается численно.

В качестве примера приведены результаты, полученные на образцах, изготовленных из стали с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1100$ МПа. Испытания проводились при следующих значениях коэффициента асимметрии цикла: 0,1; 0,3; 0,5 и 0,6. Нагрузки были выбраны таким образом, чтобы распространению трещины соответствовал третий участок диаграммы усталостного

разрушения, на котором логарифмическая зависимость $da/dN - \Delta K_I$ существенно отличается от линейной. Как показал эксперимент, количество циклов до разрушения лежит в диапазоне $10^3 \div 10^4$. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость $da/dN - \Delta K_I$, полученная при перечисленных выше коэффициентах асимметрии цикла. Для каждого значения R_p на рис. 2 указано количество циклов, которое потребовалось для распространения трещины от значения $a/b = 0,35$ до разрушения. Сплошными линиями на рисунке показаны расчетные зависимости, полученные из соотношения Р. Формена при значениях $R_p = 0,1; 0,3; 0,5$ и $0,6$. Параметры C_F , m_F и K_{Ic} определены из системы уравнений (4) на основании экспериментальных данных, полученных на образцах при четырех значениях R_p и имеют следующие значения $C_F = 6,84 \cdot 10^{-8}$, $m_F = 3,32$, $K_{Ic} = 6650 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0,5}$. Учитывая разброс, характерный для усталостных испытаний, на основании анализа сделан вывод, что использование трех указанных параметров позволяет качественно и количественно описать рост усталостной трещины на последнем этапе ее распространения, непосредственно перед разрушением. На рис. 3 показан рост усталостной трещины в процессе циклического нагружения при различных коэффициентах асимметрии от начального значения $a/b = 0,35$ до разрушения; указаны значения $K_{I\max}$, которые были зафиксированы на каждом образце перед разрушением. Полученное значение $K_{Ic} = 6650 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0,5}$ лежит в диапазоне значений, полученных при стандартных испытаниях по исследованию вязкости разрушения. Таким образом, экспериментальные данные, полученные на образцах, испытанных при различных коэффициентах асимметрии цикла, позволяют косвенно определить критическое значение коэффициента интенсивности напряжений.

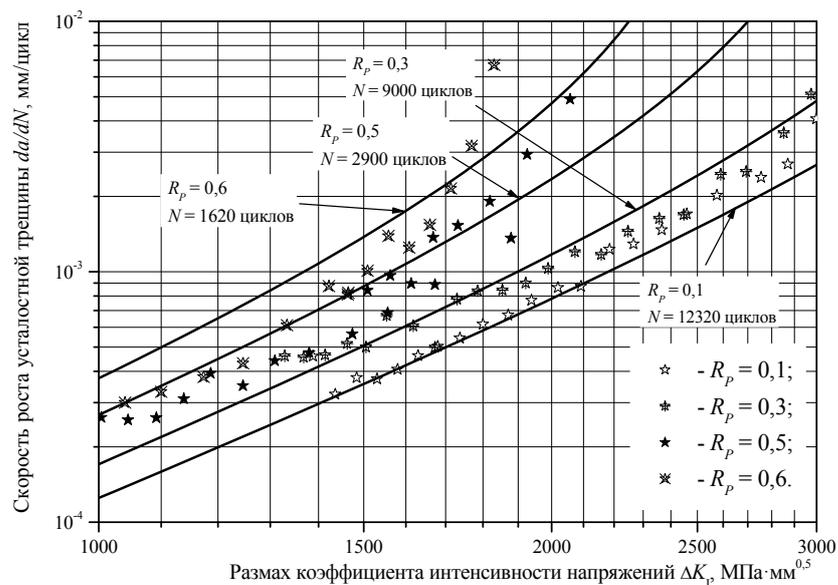


Рисунок 2 - Зависимость скорости роста усталостной трещины на воздухе от размаха коэффициента интенсивности напряжений; на рисунке приведены значения числа циклов N до разрушения

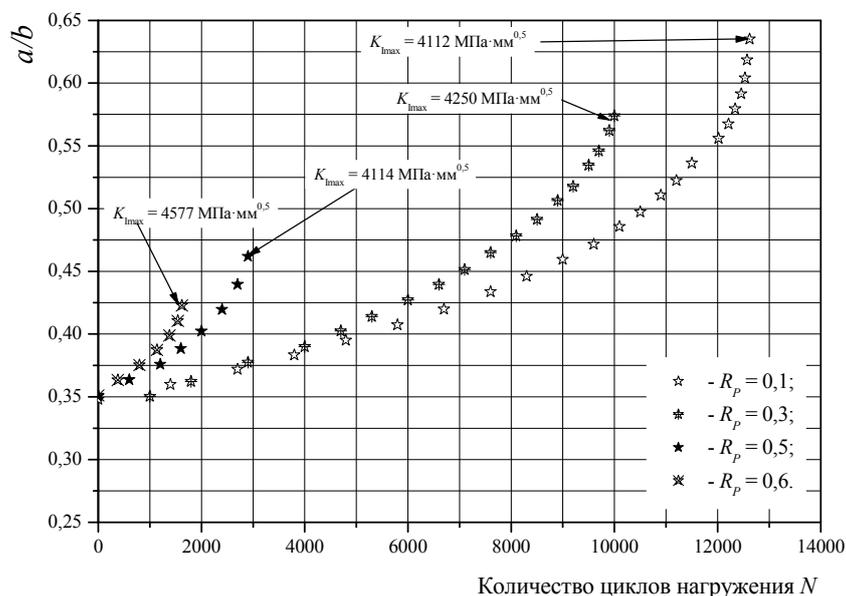


Рисунок 3 - Рост относительной глубины усталостной трещины при различных значениях коэффициента асимметрии цикла; указаны значения K_{max} перед разрушением

В §5 представлено экспериментальное исследование распространения усталостной трещины, когда минимальная нагрузка вызывает закрытие трещины, а максимальная нагрузка может вызывать и раскрытие трещины

($R_p < 0$), и закрытие ($R_p > 1$). Плоские образцы с трещинами, исходящими от круглого отверстия, подвергались циклическому растяжению – сжатию или сжатию – сжатию.

Для наблюдения за ростом усталостной трещины в образце использовался цифровой микроскоп Dino - Lite Pro модель AM - 413ZT, установленный с помощью штатива на столе испытательной машины. Испытания проводились в режиме управления по нагрузке с коэффициентами асимметрии цикла $R_p = 0,1$ (растяжение - растяжение); $R_p = -1$ (симметричное растяжение-сжатие); $R_p = -1,5$ (несимметричное растяжение - сжатие) и $R_p = 10$ (сжатие-сжатие). На рис. 4 представлена зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для образцов с круглым надрезом при $R_p = 0,1$; -1 и $-1,5$. Для сравнения на рисунке приведены данные, полученные для этой стали в условиях трехточечного изгиба при $R_p = 0,1$. Как видно из рисунка, влияния вида напряженного состояния на усталостную кривую не наблюдается. В условиях знакопеременного нагружения имеет место существенное влияние коэффициента асимметрии цикла, то есть по мере роста составляющей сжатия и уменьшения составляющей растяжения скорость роста усталостной трещины уменьшается. При переходе к нагружению типа сжатие - сжатие ($R_p = 10$) в пределах $N = 50000$ циклов роста трещины не наблюдалось.

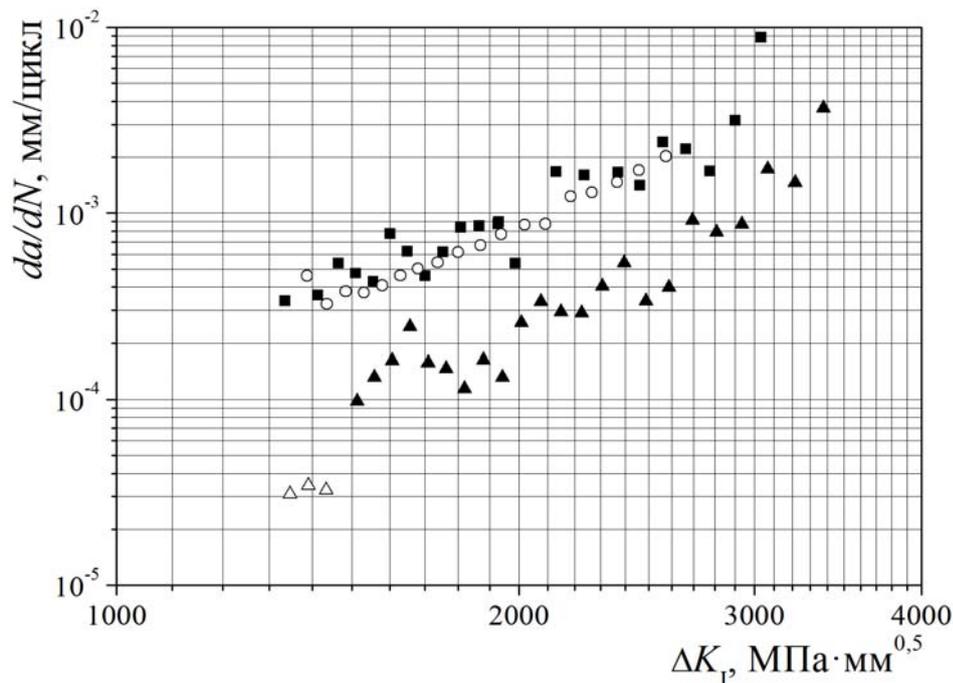


Рисунок 4 - Зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для образцов с круглым надрезом

- - растяжение образца с круглым отверстием $R = 0,1$;
- ▲ - растяжение - сжатие образца с круглым отверстием $R = -1$;
- △ - растяжение - сжатие образца с круглым отверстием $R = -1,5$;
- - призматический образец, изгиб $R = 0,1$.

Чтобы оценить вклад составляющих растяжения и сжатия в отдельно-сти, экспериментальные данные были обработаны в форме зависимости скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений, соответствующего составляющей растяжения (ΔK_{Itens}). Полученные зависимости представлены на рис. 5. Имеет место некоторое ускорение роста усталостной трещины под действием составляющей сжатия при симметричном знакопеременном нагружении $R_p = -1$.

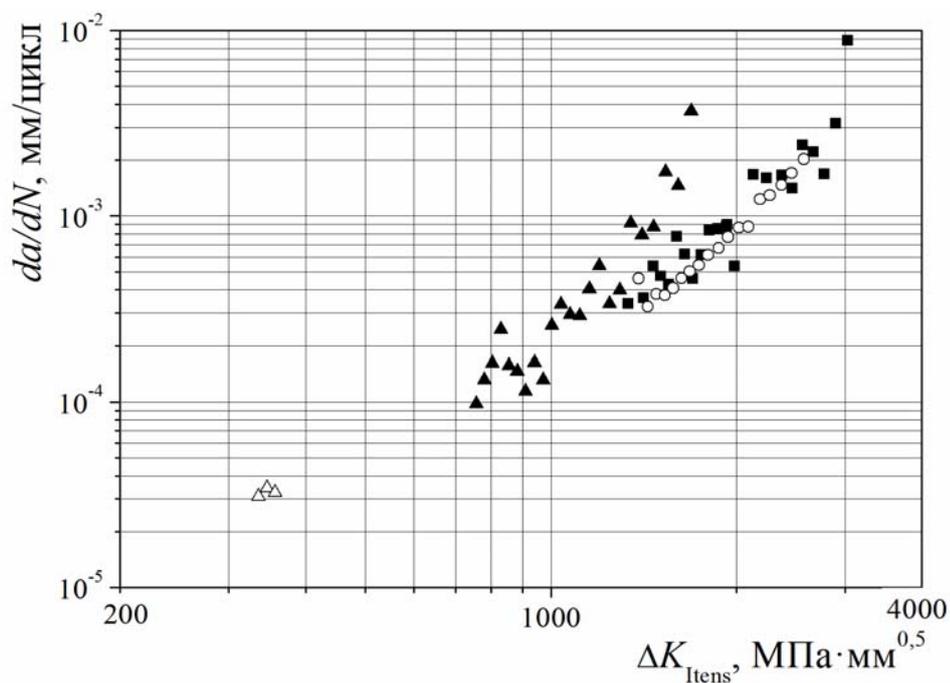


Рисунок 5 - Зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для образцов с круглым надрезом

- - растяжение образца с круглым отверстием $R = 0,1$;
- ▲ - растяжение - сжатие образца с круглым отверстием $R = -1$;
- △ - растяжение - сжатие образца с круглым отверстием $R = -1,5$;
- - призматический образец, изгиб $R = 0,1$.

Была исследована возможность использования соотношения Р. Формена для описания усталостной кривой в случае знакопеременного цикла нагружения ($R_p < 0$). На рис. 6 приведены экспериментальные данные, полученные на образцах с отверстием и кривые Р. Формена, построенные при значениях параметров $C_F = 6,84 \cdot 10^{-8}$, $m_F = 3,32$, $K_{Ic} = 6650 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0,5}$, полученных в §4 данной главы.

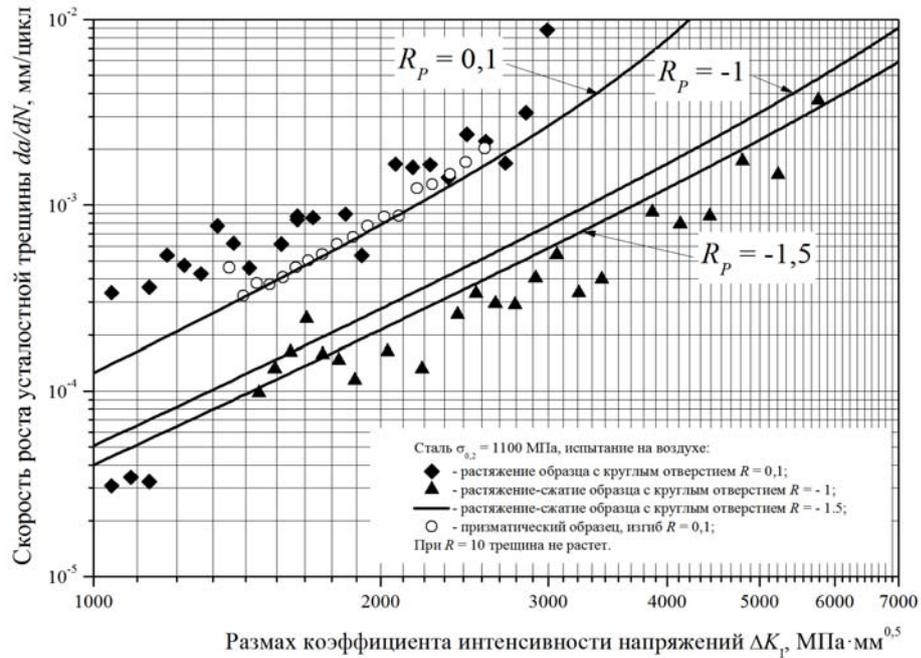


Рисунок 6 - Экспериментальные данные, полученные на образцах с круглым отверстием

Как видно из рис. 6, соотношение R . Формена достаточно близко описывает уменьшение скорости роста усталостной трещины в случае знакопеременного цикла по сравнению с циклом растяжения. При $R_p \rightarrow -\infty$, то есть при очень малой составляющей растяжения скорость роста усталостной трещины как в эксперименте, так и в расчете по формуле R . Формена стремится к нулю. Для случая сжатие – сжатие формулу R . Формена применять нельзя, так как она имеет смысл только в диапазоне $-\infty < R_p < 1$.

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработана методика оценки циклической прочности материала во всем диапазоне условий нагружения. Она включает выбор типа образцов, и состава нагрузок, использование для обработки результатов испытаний модели R . Формена и получение параметров модели согласно системе уравнений (4).

Во **второй** главе диссертационной работы экспериментально исследована циклическая трещиностойкость материала при наличии в образцах остаточных сварочных напряжений и построена модель их учета при оценке цик-

лической трещиностойкости. При наличии остаточных сварочных напряжений в процессе распространения трещины коэффициент интенсивности напряжений в ее вершине определяется совместным действием внешней нагрузки и сварочных напряжений. Это обстоятельство приводит к существенному различию между R_P и R_{K_I} , причем в процессе продвижения трещины по толщине образца или элемента конструкции коэффициент асимметрии по нагрузке R_P остается постоянным, а коэффициент асимметрии по коэффициенту интенсивности R_{K_I} изменяется. В диссертационной работе обработка экспериментальных данных произведена на основании расчета коэффициентов интенсивности напряжений, соответствующих совместному действию внешней нагрузки и остаточных сварочных напряжений. Такая обработка позволяет использовать параметры трещиностойкости, характеризующие материал сварного шва, при произвольном распределении напряжений. На основе предложенной модели проведен цикл испытаний.

В §1 дано описание образцов и процедуры испытаний. Образцы с боковым надрезом (SENB) были вырезаны поперек сварного шва из листа, сваренного из корпусной стали с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1000$ МПа с использованием аустенитной сварочной проволоки. Образцы испытывались на воздухе и в морской воде. Испытания проводились при коэффициенте асимметрии $R_P = 0,1$.

В §2 дано описание методов обработки экспериментальных данных.

Коэффициент интенсивности напряжений $K_{I_{св}}$, обусловленный остаточными сварочными напряжениями, определяется на основании результатов работ С. Вайдянатана, И.Финни; О.Г.Рыбакиной по формуле:

$$K_{I_{св}}(a) = E' \sqrt{\pi a} \frac{1}{2\sqrt{2} [1 + m_1(a) + m_2(a)]} \frac{d\delta(a)}{da}, \quad (5)$$

где $E' = E/(1 - \nu^2)$, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, $m_1(a)$, $m_2(a)$ – известные функции глубины трещины, $\delta(a)$ – раскрытие трещины на поверхности ненагруженного образца под действием остаточных

сварочных напряжений, которое в диссертационной работе определено экспериментально как функция глубины трещины.

Полученные зависимости раскрытия трещины $\delta(a)$ и распределения коэффициента интенсивности напряжений, обусловленного остаточными сварочными напряжениями, от глубины надреза приведены на рис. 7 и 8.

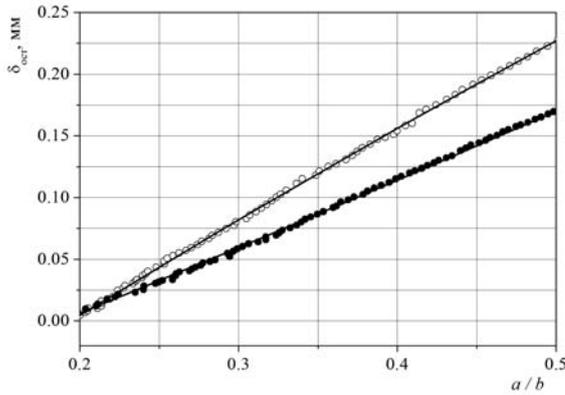


Рисунок 7 - Экспериментальная зависимость раскрытия трещины от ее глубины (зона термического влияния, 2 образца)

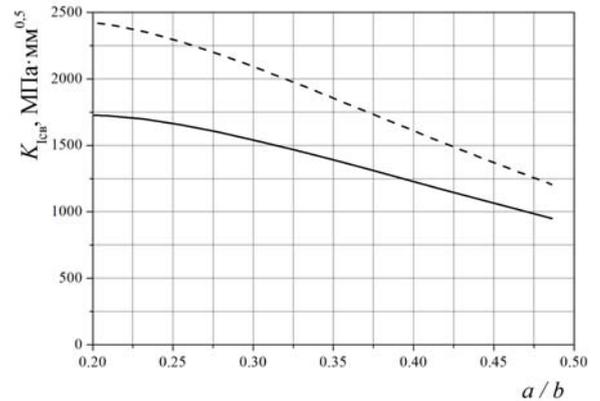


Рисунок 8 - Распределение $K_{I_{св}}$ по ширине сварного образца (зона термического влияния, 2 образца)

На основе выполненных исследований в §3 диссертационной работы представлена процедура построения диаграммы усталостного разрушения металла сварного шва. Необходимо проведение следующих испытаний:

- экспериментальное построение зависимости $da/dN - \Delta K_I$ на сварном образце;
- экспериментальное определение зависимости раскрытия трещины на поверхности ненагруженного сварного образца от глубины трещины и расчет зависимости коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины, обусловленного сварочными напряжениями, от глубины трещины.

На основании этих данных произведен расчет коэффициента асимметрии $R_{K_I} = K_{I_{\min}} / K_{I_{\max}}$; значения максимальных и минимальных коэффициентов интенсивности напряжений определялись по формулам $K_{I_{\min}} = K_{IP_{\min}} + K_{I_{св}}$, $K_{I_{\max}} = K_{IP_{\max}} + K_{I_{св}}$, где значения $K_{IP_{\min}}$ и $K_{IP_{\max}}$ вычисляются по известным формулам линейной механики разрушения. Затем

проведена обработка экспериментальных данных методами, разработанными в главе 1.

Для испытанных образцов получены следующие значения постоянных $C_F = 2,58 \cdot 10^{-11}$; $m_F = 3,24$ и $K_{Ic} = 4243$ МПа мм^{0,5}.

На рис. 9 сплошными линиями показаны зависимости $da/dN - \Delta K_I$, соответствующие соотношению Р. Формена для полученных значений постоянных при различных значениях коэффициента асимметрии R_{K_I} , экспериментальные точки соответствуют диапазону R_{K_I} $0,17 < R_{K_I} < 0,64$. Данные рисунка свидетельствуют о хорошем соответствии результатов расчета и экспериментальных данных. На их основании сделан вывод, что отказ от учета коэффициента асимметрии цикла по K_I при обработке экспериментальных данных, приводит к некорректной оценке трещиностойкости металла шва, что может приводить к ошибке как в опасную, так и в безопасную сторону в зависимости от R_{K_I} и ΔK_I . На рис. 9 приведена кривая, соответствующая $R_{K_I} = 0,1$; пунктирной линией показана усталостная кривая, полученная на образцах, изготовленных из материала сварного шва и не имеющих остаточных сварочных напряжений, при $R_p = 0,1$ (Г.П. Карзов, В.П. Леонов, Б.Е. Тимофеев «Сварные сосуды высокого давления», 1982); имеет место хорошее соответствие.

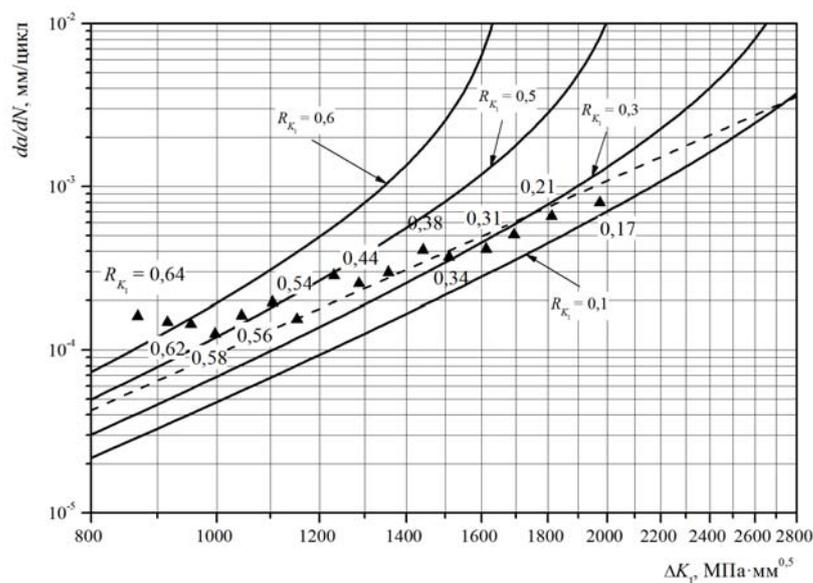


Рисунок 9 - Диаграммы усталостного разрушения, полученные в результате испытаний сварного образца

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработан метод оценки усталостной прочности конструкции при произвольном соотношении коэффициентов интенсивности напряжений, обусловленных внешней нагрузкой и остаточными сварочными напряжениями.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты экспериментального исследования влияния предварительной пластической деформации одного знака на поведение конструкционных сталей при нагружении напряжением противоположного знака. Исследованы стали с пределом текучести на растяжение $\sigma_{0,2}$, лежащем в диапазоне $280 \div 1230$ МПа, для которых в исходном состоянии характерна диаграмма растяжения с выраженным упругим участком и последующим переходом в область упрочнения. При оценке предела текучести используется общепринятый в технике допуск на пластическую деформацию 0,2 %.

Разработан метод приближенной оценки влияния предварительного технологического пластического деформирования материала (эффект Баушингера) на устойчивость круговых цилиндрических оболочек, нагруженных равномерным внешним давлением. Изложена приближенная методика оцен-

ки влияния предварительного пластического деформирования на устойчивость круговых цилиндрических оболочек сформированных методом холодной обработки давлением.

Рассмотрено два принципиально различных случая:

- эффект предварительного пластического деформирования захватывает всю толщину конструкции (экспандирование);
- эффект предварительного пластического деформирования распределен по линейному закону (холодный загиб листа при формировании оболочки).

В §1 представлены результаты экспериментального исследования изменения упруго - пластических свойств металлов после предварительного пластического деформирования. Испытания были проведены на сталях марок Ст3, СХЛ-4, 09Г2 и сталях с пределом текучести более 780 МПа.

В результате экспериментальных исследований получено, что эффект Баушингера на всех материалах существенен и стабилизируется, начиная со значения пластической деформации порядка 1%. Имеет место не только количественное различие в пределах текучести материала при прямом и противоположном направлениях нагружения, но меняется форма диаграммы, упругий участок диаграммы не выражен.

Экспериментальные результаты показали:

- при однократном нагружении стали марок Ст3, 09Г2, СХЛ-4 имеет место упрочнение, близкое к трансляционному, и эффект Баушингера, близкий к идеальному; на сталях с пределом текучести, бóльшим 600 МПа, трансляционное упрочнение сопровождается не упрочнением, а разупрочнением материала;

– после предварительного циклического нагружения диаграммы стали с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 780$ МПа, записанные на первом цикле, не показали существенного отличия от диаграмм, записанных на цикле с номером $N_p / 2$, где N_p – количество циклов до разрушения.

В диссертационной работе автором проведено экспериментальное определение касательного модуля E_k после предварительного пластического деформирования. Касательный модуль является важной характеристикой упруго - пластических свойств материала и используется, в частности, в расчетах критической нагрузки, вызывающей потерю устойчивости конструкции. На рис. 10 показан относительный касательный модуль E_k как функция относительного напряжения $\sigma/\sigma_{0,2}$, полученный для исходной диаграммы сжатия и диаграмм сжатия после предварительного деформирования растяжением на стали с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 780$ МПа. Имеет место существенное снижение касательного модуля, вызванное предварительным наклепом противоположного знака. Жирная горизонтальная линия соответствует пределу пропорциональности материала, для которого по определению $E_k/E = 0,67$. Как следует из рисунка, значения напряжений, соответствующих пределу пропорциональности, показанные пунктирными линиями, также существенно снижаются с увеличением наклепа.

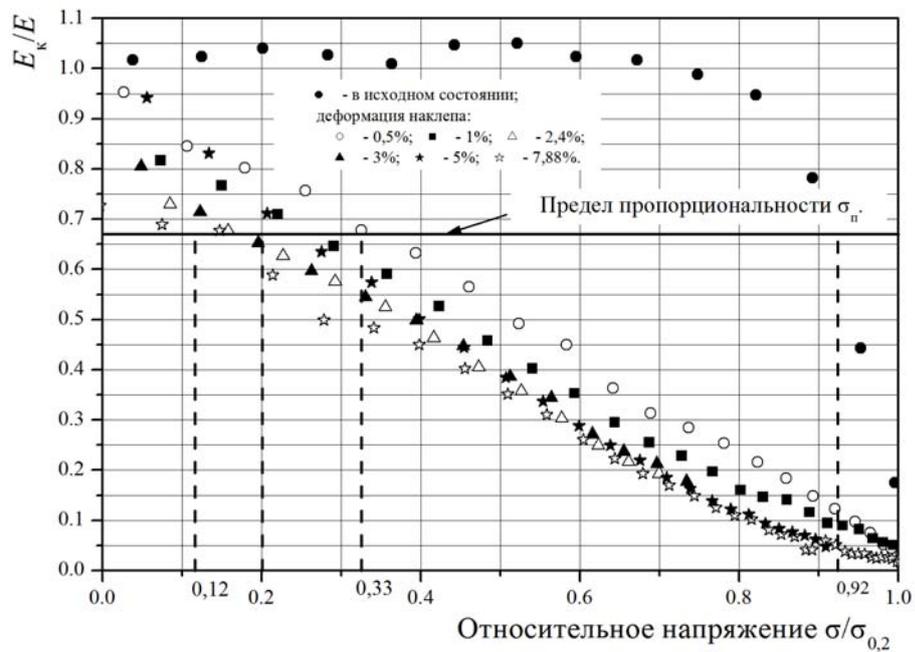


Рисунок 10 - Изменение относительного значения касательного модуля на диаграммах сжатия материала в исходном состоянии и после предварительного наклепа

В §2 произведен учет влияния предварительного пластического деформирования материала на устойчивость при экспандировании (предварительные пластические деформации равномерно распределены по всей толщине конструкции) труб для подводных трубопроводов.

Для учета влияния предварительной пластической деформации на устойчивость использована стандартная процедура замены модуля нормальной упругости E приведенным модулем $E_{пр}$. Для равномерно сжатого стержня эта процедура (при отсутствии предварительных пластических деформаций) сводится к следующему. До момента потери устойчивости все поперечное сечение равномерно сжато напряжениями σ . В момент потери устойчивости на исходное равномерное напряжение накладываются переменные по высоте z сечения дополнительные «изгибные» напряжения $\Delta\sigma(z)$. В зонах, где они совпадают по направлению с σ , происходит догрузка и материал продолжает пластически деформироваться. $E_{пр}$ определяется из выражения для дополнительного момента, возникающего при потере устойчивости

$$\Delta M = \frac{1}{12} \frac{4EE_k}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_k})^2} \Delta k, \quad (6)$$

где Δk - приращение кривизны. Сравнивая (6) с аналогичным выражением для упругого решения, находим приведенный модуль $E_{пр}$

$$E_{пр} = \frac{4EE_k}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_k})^2}. \quad (7)$$

Учет уменьшения модуля нормальной упругости корректируется введением поправочного коэффициента

$$\eta_2 = \frac{\Delta M}{\Delta M_{упр}} = \frac{E_{пр}}{E} = \frac{4E_k}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_k})^2}. \quad (8)$$

Напряжение потери устойчивости $\sigma_{кр}$ определяется по известной формуле

$$\sigma_{кр} = \eta_2 \sigma_3, \quad (9)$$

где σ_3 - теоретическое напряжение потери устойчивости

Показано, что приведенное решение хорошо распространяется на оценку устойчивости экспандированных труб с заменой исходного предела текучести σ_T на предел текучести σ_c сжатия материала, подвергшегося технологической обработке.

В §3 произведен учет влияния предварительного пластического деформирования материала при формировании цилиндрической оболочки (холодный загиб листа). В этом случае технологические остаточные деформации $e_{\text{п}}$ изменяются линейно по толщине

$$e_{\text{п}} = z/h,$$

где h - толщина оболочки.

В зонах на поверхности оболочки возникают достаточно большие остаточные деформации и при изменении знака напряжения, как следствие, снижается до σ_c предел текучести. По мере удаления от поверхности остаточные технологические деформации уменьшаются и предел текучести σ_c сближается с σ_T . На расстоянии a от поверхности технологические деформации не оказывают влияния на последующее поведение материала и предел текучести оказывается равным исходному пределу текучести. Снижение в зоне a предела текучести сопровождается снижением касательного модуля $E_{\text{к}}$, который меняется до E_a на границе зоны a . Используется стандартная процедура замены исходного модуля нормальной упругости E приведенным модулем $E_{\text{пр}}$, описанная в §2. Дополнительный момент при потере устойчивости в этом случае оказывается равным

$$\Delta M = \left[E \int_{h_1-h}^0 z^2 dz + E_{\text{к}} \int_0^{h_1-a} z^2 dz + \int_{h_1-a}^{h_1} E_a(z) z^2 dz \right] \Delta \varepsilon_0 = M_{\text{упр}} \frac{E_{\text{пр}}}{E}, \quad (10)$$

где h_1 - расстояние нейтральной оси от наружной поверхности оболочки.

Входящая в (10) величина a определяется из условия

$$\frac{a}{h} = \frac{1}{2} - 0,002 \frac{r}{h}, \quad (11)$$

где r - радиус оболочки.

Равенства (10) и (11) дают возможность найти значения η_2 для оболочек различной относительной толщины при различных отношениях σ_3/σ_T , то есть отношения эйлерова напряжения и предела текучести рассчитываемой оболочки.

Решение строилось для оболочек при $0,004 < h/r < 0,01$. На рис. 12 приведена зависимость поправочного коэффициента η_2 от отношения σ_3/σ_T .

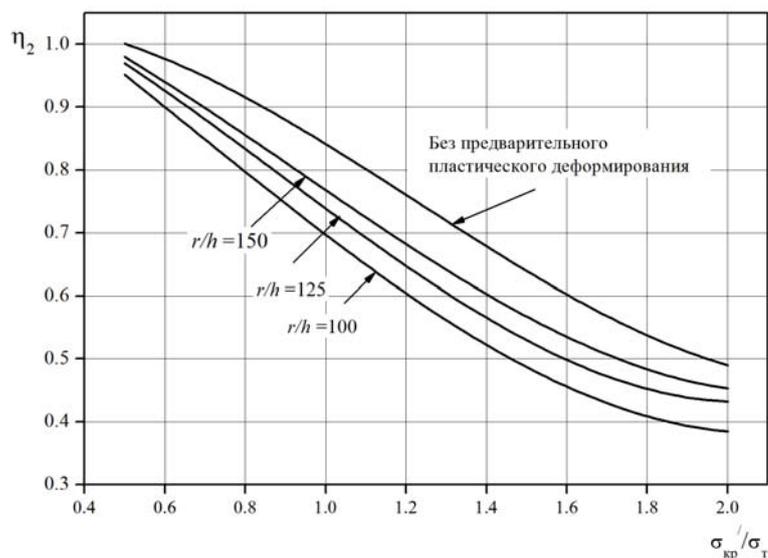


Рисунок 12 - Зависимость η_2 от отношения σ_3/σ_T

Показана существенная роль эффекта Баушингера в оценке устойчивости оболочек и разработана приближенная методика этой оценки. Разработанное решение может быть использовано при аттестации материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований получены важные в прикладном и теоретическом отношении результаты:

1 Разработан уточненный метод оценки циклических свойств (малочикловая трещиностойкость) материалов для подводной техники. В отличие от действующих, в методе учтен весь диапазон изменения внешних нагрузок на конструкции по их величинам, знаку (растяжение - сжатие), степени

асимметрии, а также присутствие в конструкциях остаточных напряжений производственного происхождения.

2 Установлен ряд новых, важных для оценки поведения в конструкции свойств материалов, в частности:

- выявлено существенное влияние на скорость развития повреждений в конструкциях степени асимметрии цикла нагружения; выявленная особенность должна учитываться как при обработке экспериментальных данных, так и выполнении расчетов циклической долговечности конструкций;

- выявлено, что при асимметрии цикла по нагрузке, характеризующейся существенным превышением по абсолютному значению сжимающих напряжений над растягивающими, скорость развития трещины уменьшается по мере уменьшения коэффициента асимметрии. При некотором предельном значении коэффициента асимметрии трещина в пределах рассматриваемого числа нагружений ($10^3 \div 10^4$ циклов) практически не развивается.

3 Предложен новый метод определения критического значения коэффициента интенсивности напряжений, основанный на использовании результатов циклических испытаний с разной асимметрией цикла нагрузок и соотношений Р. Формена.

4 Обобщены результаты испытаний влияния предварительной пластической деформации на упруго - пластические свойства материалов. Предварительная пластическая деформация существенно снижает касательный модуль и предел текучести материала при нагружении в противоположном направлении по сравнению с касательным модулем и пределом текучести исходного материала (эффект Баушингера). Показано, что указанное изменение касательного модуля необходимо учитывать при расчете на устойчивость цилиндрических оболочек и, в частности, трубопроводов.

5 Разработан метод учета влияния на устойчивость оболочек морской техники изменения статических свойств материала под воздействием технологических операций, связанных с предварительным пластическим деформированием.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**В журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ:**

1 Рыбакина О.Г., Нигматуллин В.И. Влияние асимметрии цикла, обусловленной остаточными сварочными напряжениями, на циклическую трещиностойкость металлов// Труды Центрального научно – исследовательского института им. акад. А.Н. Крылова, СПб, вып. 56 (340), 2010, с. 97 - 106 (автор - 50%).

2 Нигматуллин В.И. Экспериментальное исследование влияния предварительной пластической деформации на поведение конструкционных сталей при обратном нагружении// Труды Центрального научно – исследовательского института им. акад. А.Н. Крылова, СПб, вып. 60 (344), 2011, с. 119 – 132.

3 Нигматуллин В.И. Циклическая трещиностойкость высокопрочной стали на стадии, предшествующей разрушению// Труды Центрального научно – исследовательского института им. акад. А.Н. Крылова, СПб, вып. 67 (351), 2012, с. 93 – 98.

4 Нигматуллин В.И., Палий О.М., Рыбакина О.Г. Экспериментальная оценка влияния сжимающих напряжений на циклическую трещиностойкость конструкционных материалов// Труды Крыловского государственного научного центра, СПб, вып. 75 (359), 2013, с. 61 - 68 (автор - 50%).

5 Палий О.М., Рыбакина О.Г., Нигматуллин В.И. Приближенная оценка влияния предварительного пластического деформирования материала на устойчивость оболочек// Труды Крыловского государственного научного центра, СПб, вып. 75 (359), 2013, с. 118 - 124 (автор - 50%).

В других изданиях:

6 Нигматуллин В. И. Влияние на расчетные параметры циклической трещиностойкости материалов методов обработки результатов эксперимента// Сборник научных трудов I Всероссийского конкурса молодых ученых «Механика и процессы управления», Екатеринбург, 2009, с. 75 - 84.

7 Рыбакина О.Г. Нигматуллин. В.И. Влияние асимметрии цикла, обусловленной остаточными сварочными напряжениями на циклическую трещиностойкость металлов// Тезисы докладов конференции по строительной механике корабля памяти академика Ю.А. Шиманского, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2008, с. 112 – 113 (автор - 50%).

8 Нигматуллин. В.И. Циклическая трещиностойкость высокопрочной стали на стадии, предшествующей разрушению// Тезисы докладов конференции по строительной механике корабля памяти академика Ю.А. Шиманского, ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, СПб, 2011, с. 68 – 69.

9 Nigmatullin V.I. Preliminary plastic strain impact in calculations of structures dedicated to reverse – sign deformations// Proceedings of 6th International Conference NAVY and shipbuilding nowadays.

10 Нигматуллин В.И., Палий О.М., Рыбакина О.Г. Влияние компоненты сжатия на циклическую трещиностойкость конструкционных материалов// Тезисы докладов конференции по строительной механике корабля памяти академика П. Ф. Папковича, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», СПб, 2012, с. 93 – 94 (автор - 50%).