

«УТВЕЖДАЮ»

И.о. ректора Санкт-Петербургского
государственного морского технического
университета д.т.н.



Тряскин В.Н.

2014 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Санкт - Петербургского государственного морского технического университета - о диссертации Нигматуллина Владимира Игоревича «Разработка методов оценки циклических и статических свойств металлических материалов с учетом особенностей технологических построечных операций и возможных режимов эксплуатации корпусов подводных объектов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика».

Разработка методов оценки сопротивляемости разрушению конструкций морской техники может быть проведена только на базе рассмотрения статических и циклических нагрузок и учета механических свойств используемых материалов и особенностей принятых технологических процессов. Для обеспечения прочности и работоспособности конструкции необходим детальный учет характера ее эксплуатации в отношении переменности нагрузок. Внедрение в судостроение новых корпусных материалов и технологических процессов вызывает необходимость изучения влияния этих процессов на свойства материалов и, как следствие, на прочность конструкции. Совершенствование методов оценки прочности и работоспособности конструкций корпусов подводной техники требует уточнения прогнозирования малоциклового усталости материалов с учетом особенностей их нагружения в конструкции и влияния сварочных напряжений.

Достижения линейной и упруго - пластической механики разрушения позволяют рассматривать циклическую прочность материала как циклическую трещиностойкость. В основе всех существующих моделей описания циклических свойств материалов лежат экспериментальные исследования. Существенный объем известных в литературе данных относится к исследованию влияния асимметрии цикла нагружения на поведение трещины. Однако эти данные относятся к линейному участку усталостной кривой и не охватывают диапазон $10^3 \div 10^4$ циклов нагружения. Этот диапазон представляет большой практический интерес и при его исследовании обнаруживается существенное влияние

особенностей циклического нагружения (асимметрия, влияние сжатия, критическая величина коэффициента интенсивности напряжений) и наличие остаточных сварочных напряжений. Задача изучения влияния таких технологических процессов как глубокое пластическое деформирование «в холодную», экспандирование труб, также далека от завершения.

Научная значимость представленной диссертации заключается в том, что проведенные автором исследования вносят существенный вклад в развитие прикладных разделов механики разрушения материалов и конструкций, предоставляя экспериментальный материал и теоретические разработки для решения одной из сложнейших задач механики разрушения — корректной оценки циклической трещиностойкости и предельно допустимых уровней напряжений.

Представленная на отзыв диссертация Нигматуллина В.И. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 38 наименований, 3 приложений, 40 рисунков, 6 таблиц. Общий объем основного текста с иллюстрациями составляет 97 стр.

В первой главе диссертации дан обзор исследований кинетических диаграмм усталостного разрушения и характеристик циклической трещиностойкости металлических материалов. Существенной особенностью этих диаграмм является наличие среднего прямолинейного (пэрисовского) и двух крайних криволинейных участков с низкими и высокими скоростями роста усталостной трещины. Наименее исследован и теоретически и экспериментально третий участок, на котором значения максимального коэффициента интенсивности напряжений становятся относительно близкими к его критическому значению. Этому участку соответствует количество циклов до разрушения, лежащее в диапазоне $10^3 \div 10^4$ циклов, что несомненно представляет большой практический интерес. Слабая, по сравнению с другими областями, изученность этого участка диаграммы усталостного разрушения, объясняется серьезными трудностями, возникающими при проведении экспериментальных исследований, т.к. работа в области, близкой к критическому состоянию, создает трудности при измерении и обработке получающихся экспериментальных данных.

Из параметров цикла нагрузки помимо размаха коэффициента интенсивности напряжений наиболее важным является асимметрия цикла, т.е. отношением наименьшего ее значения к наибольшему. В диссертации скорость роста усталостной трещины предполагается зависящей от этих двух величин, и в качестве основного соотношения используется зависимость Р. Формена. Входящие в эту зависимость постоянные C , m и K_{Ic} подлежат экспериментальному определению. Особо следует остановиться на

использовании параметра K_{Ic} , который является характеристикой статической трещиностойкости материала и должен определяться при проведении стандартных испытаний. Однако, известно, что корректное определение этой величины для материалов с высокими пластическими свойствами вызывает серьезные трудности. В диссертации предложен такой метод обработки данных, который позволяет определить все три из перечисленных параметров. Сопоставление полученных результатов с данными статических испытаний показало их хорошее соответствие.

Проведение испытаний в условиях значительной скорости роста усталостной трещины потребовало от автора разработки специальной компьютерной программы проведения испытаний и обработки экспериментальных данных (ИМЯН. 0302.01 - 01 «CRACK_CYCLE»). Все необходимые данные (время, нагрузка, раскрытие трещины) фиксируются с предварительно заданным интервалом по приращению глубины трещины в интервале $0,1 \div 2,0$ мм, что позволяет проводить испытания непосредственно до момента разрушения.

Экспериментально исследована циклическая трещиностойкость листового проката стали с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1100$ МПа на воздухе и в морской воде, показано, что влияние асимметрии цикла наиболее существенно сказывается на высокоамплитудном участке диаграммы.

Особо рассмотрено влияние составляющей сжатия на рост усталостной трещины в условиях растяжение - сжатие и показано, что включение в обработку участка сжатия приводит к консервативной оценке трещиностойкости материала.

Актуальность полученных данных не вызывает сомнений, так как они являются основой для разработки научно обоснованных методик испытаний на трещиностойкость и расчетов сопротивления срабатыванию трещин.

Вторая глава диссертации посвящена разработке метода оценки циклической трещиностойкости материала сварного шва по данным испытаний сварных образцов, имеющих остаточные сварочные напряжения. Эта проблема непосредственно связана с результатами первой главы, т.к. наличие остаточных сварочных напряжений приводит к асимметрии цикла по коэффициенту интенсивности напряжений.

Исследование проведено в два этапа: экспериментально - расчетное определение коэффициента интенсивности напряжений, обусловленного остаточными сварочными напряжениями на образцах и построение кинетической диаграммы с учетом возникшей асимметрии цикла. Испытания проведены на сварных образцах с боковым надрезом в условиях трехточечного изгиба. Были испытаны образцы, изготовленные из сварного соединения с «К» – образной разделкой кромок, выполненного из корпусной стали

12ХНЗМА с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1000$ МПа с использованием аустенитной сварочной проволоки; направление вырезки образцов - поперек сварного шва и из сварного соединения с пазовым швом со шелевой разделкой кромок, выполненным автоматической электрогазовой сваркой низколегированной проволокой марки СВ-07ХГСНЗМД; материал - сталь с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1000$ МПа. Предварительная усталостная трещина создавалась на расстоянии 2 мм от линии сплавления по зоне термического влияния и металлу сварного шва. Для расчета коэффициента интенсивности напряжений использован математический аппарат линейной механики разрушения. Для проведения расчета необходимо экспериментально определить раскрытие трещины на поверхности образца как функцию глубины трещины. В диссертации для определения этой зависимости использованы два метода: фиксация остаточного раскрытия трещины в процессе циклического нагружения и имитация распространения трещины посредством последовательного углубления надреза с помощью фрезы. Оба метода позволили определить экспериментальную зависимость между глубиной трещины и ее раскрытием, вызванным остаточными напряжениями. Наличие этих данных позволило определить коэффициент интенсивности напряжений в полосе с боковым надрезом, который существенно изменяется по толщине образца.

При обработке данных, полученных в результате усталостных испытаний, в каждом цикле были определены суммарные максимальные и минимальные коэффициенты интенсивности напряжений, соответствующие приложенной внешней нагрузке и остаточным сварочным напряжениям. В результате оказалось, что при коэффициенте асимметрии по нагрузке $R_p = 0,1$ коэффициент асимметрии по коэффициенту интенсивности напряжений R_{K_1} лежит в диапазоне $0,12 \div 0,81$, в соответствии с тем, в какой район сварочных напряжений попадает распространяющаяся усталостная трещина.

В диссертации произведена обработка полученных экспериментальных данных с учетом переменного R_{K_1} и получены экспериментальные параметры C , m и K_{Ic} . Результаты хорошо согласуются с данными по трещиностойкости материала сварного соединения, приведенными в книге Г.П. Карзова, В.П. Леонова, Б.Е. Тимофеева «Сварные сосуды высокого давления».

Важно отметить, что предложенный метод позволил определить критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, являющийся важной характеристикой трещиностойкости материала.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты экспериментальных исследований, методы количественной оценки изменений упруго -

пластических свойств металлов при технологических операциях и рассмотрено влияние предварительного технологического пластического деформирования материала на устойчивость круговых цилиндрических оболочек.

В работе исследованы стали с пределом текучести на растяжение, лежащем в диапазоне $280 \div 1200$ МПа, для которых в исходном состоянии характерна диаграмма с выраженным упругим участком и последующим переходом в область упрочнения. После предварительного пластического деформирования и перемене знака нагружения упруго-пластические свойства материала существенно изменяются (эффект Баушингера). До настоящего времени в литературе отсутствует систематическое экспериментальное исследование этого вопроса на широком круге материалов.

В диссертации основное внимание уделено двум параметрам: пределу текучести с допуском 0,2 % и касательному модулю, рассмотрено как статическое, так и циклическое нагружение. Показано, что с ростом предварительной деформации до 1 % происходит существенное снижение предела текучести, после чего имеет место стабилизация. Их полученных данных следует, что на диаграммах обратного нагружения полностью отсутствует линейный участок ввиду резкого снижения касательного модуля; одновременно снижается приведенный модуль, что указывает на необходимость учета влияния предварительной пластической деформации при расчете несущей способности конструкций.

Расчет устойчивости трубопровода показал, критическое давление существенно снижается, если материал был подвергнут пластической деформации, причем основную роль играет уменьшение предела текучести, т.е. при проведении расчетов на устойчивость экспандированной оболочки необходимо использовать предел текучести, полученный на материале при обратном нагружении.

В диссертации разработан приближенный подход, позволяющий оценить влияние предварительного пластического деформирования материала на устойчивость оболочек. Определены значения коэффициента η_2 для оболочек различной относительной толщины при различных отношениях эйлеровых напряжений и предела текучести.

При общей положительной оценке выполненных исследований необходимо сделать следующие **замечания**.

1. Циклическая трещиностойкость и влияние на нее асимметрии цикла автором подробно исследована на третьем участке диаграммы усталостного разрушения при значениях коэффициента интенсивности напряжений, близких к критическому. Как справедливо отмечает автор, эти данные являются новыми. Однако аналогичные данные по второму участку диаграммы в литературе представлены достаточно широко.

Представляет интерес провести сопоставление и, возможно, разработать общие методы оценки влияния асимметрии. Это в особенности относится к проблеме влияния знака напряжения (влияние составляющей сжатия) на поведение усталостной трещины.

2. При разработке метода оценки наличия остаточных сварочных напряжений автор обошел вниманием возможность торможения трещины при вхождении ее в область сжимающих сварочных напряжений. Эта важная проблема требует специального рассмотрения.

Приведенные замечания не влияют на общую высокую оценку работы в целом.

Значимость выполненной работы для производства заключается:

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных разработана методика ИМЯН 32-372-10 МИ «Металлические материалы. Испытания при циклическом нагружении. Методика оценки циклической трещиностойкости» и программное обеспечение для 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 отчеты по темам «Магистраль», «Порошок», «Перспектива - 3», «Корпус 949 АМ-ОКК-К», «Эффективность», «Оболочка - К», «Барьер - К» и «Приемка».

Считаем, что диссертационная работа Нигматуллина В.И. отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям и ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 - Теория корабля и строительная механика.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация рассматривалась на заседании Кафедры строительной механики корабля от 08.12.2014 г., протокол № 09/14 – 2014/2015.

Заведующий Кафедры строительной
механики корабля, д.т.н., профессор



Родионов А.А.