

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Ильина А.В. на диссертационную работу Нигматуллина В.И. «Разработка методов оценки циклических и статических свойств металлических материалов с учетом особенностей технологических построочных операций и возможных режимов эксплуатации корпусов подводных объектов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика».

Диссертационная работа Нигматуллина В.И. посвящена решению комплекса недостаточно изученных к настоящему времени проблем, связанных с прогнозированием эксплуатационной надежности корпусных конструкций глубоководной техники с учетом реальной технологии их строительства. К конкретным решаемым в работе задачам относятся: прогнозирование циклического ресурса корпусов с учетом формирования в них при сварке полей остаточных сварочных напряжений, и прогнозирования нагрузки потери устойчивости корпуса с учетом возможности изменения диаграмм деформирования материала в результате операций холодного деформирования. Обе эти задачи можно считать достаточно актуальными. Для описания кинетики усталостной трещины в настоящее время предложено множество эмпирических формул, но все они имеют ограниченный диапазон применения, а их достоверность не проверена для высокопрочных сталей. В то же время фактический диапазон изменения коэффициента асимметрии цикла нагружения R , резко влияющего на скорость роста трещины, для конструкций глубоководной техники может варьироваться от $-\infty$ (для циклов нагрузки с преобладанием сжимающих эксплуатационных напряжений) до близкого к $+1$ (при предельно высоком уровне остаточных сварочных напряжений). Такой диапазон изменений R не охватывается в имеющихся нормативных документах и рекомендациях по расчетам циклической прочности. В части анализа влияния трансформации диаграмм деформирования материала на прочность конструкций в настоящее время полностью отсутствуют методики оценки значимости этого фактора – хотя практика определения т.н. «эффекта Баушингера» для судостроительных сталей существует достаточно давно.

Диссертационная работа Нигматуллина В.И. состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений, содержащих результаты испытаний.

В первой главе выполнен анализ известных литературных данных по влиянию асимметрии цикла нагружения и обращено внимание на различие параметра R в случае определения его по прикладываемой нагрузке (R_p) и по отношению фактических значений коэффициентов интенсивности напряжений $K_{I_{max}}$ и $K_{I_{min}}$, определенных с учетом действия остаточных сварочных напряжений (R_k). Описывается разработанная автором методика испытаний образцов типа SENB с контролем длины трещины по датчику раскрытия (метод податливости) и обработки данных, записываемых в автоматическом режиме в виде программных файлов. Для определения точного значения податливости образца методом наименьших квадратов определяется наклон диаграммы «изменение нагрузки ΔP – изменение раскрытия трещины v » на интервале от P_{max} до $P_{max}/2$ на участке разгрузки. При $R > 0.1$ эффект закрытия трещины не наблюдался. Методика отработывалась при испытаниях стали категории прочности X80 на воздухе и в морской воде. Обработка данных проводилась по формуле Пэриса, с вычислением математически ожидаемых значений параметров формулы и значений, соответствующих верхним огибающим массива данных. Интересно отметить, что для испытаний в коррозионной среде получены разительные отличия от предсказаний стандарта BS 7910.

На следующем этапе исследований выполнены испытания с варьированием асимметрии цикла в знакоположительной области и проведена обработка данных. Для этого предложено использовать известное соотношение Р. Формана. Оригинальным в данной обработке является рассмотрение присутствующей в этой формуле величины K_{Ic} как неизвестной, подлежащей определению из принципа наилучшего совпадения с комплексом данных, полученных при различном R . Испытания проведены на стали с пределом текучести 1100 МПа при R_p (в данном случае совпадает с R_k), равном 0.3, 0.5 и 0.6. Получено прогнозируемое значение $K_{Ic} = 4112 - 4577 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0.5}$. Диапазон измеряемых значений скорости трещины da/dN – от 10^{-4} до 10^{-2} мм/цикл.

По этому разделу в качестве замечания следует обратить внимание на отсутствие сведений о размерах испытанных образцов и отсутствии анализа

допустимости использования параметра K как характеристики, однозначно контролирующей напряженно-деформированное состояние в вершине трещины. Например, при испытаниях при $R = 0.6$ приведены данные для уровней ΔK , соответствующих $K_{I\max}$ порядка $5000 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{0.5}$. В этих случаях размер зоны пластической деформации в вершине трещины может приближаться к ширине нетто-сечения – и тогда надо либо учитывать поправку Дагдейла, либо переходить на описание с использованием J -интеграла. Также было бы целесообразно сопоставить полученную оценку K_{Ic} с данными по статической трещиностойкости. Известно, что данные стали при комнатной температуре находятся в достаточно вязком состоянии и речи об определенном значении K_{Ic} быть не может. Однако по физическому смыслу с определенной автором величиной можно соотнести значение J -интеграла при стагнации вязкой трещины (J_i) и, переходя от J к K может быть получена близкая оценка.

Далее изложены результаты исследований циклической трещиностойкости при $R < 0$ и полностью сжимающем цикле. Для этого автором использован образец с центральной трещиной. Трещина инициировалась от отверстия в центре пластины (может быть, было бы целесообразней делать пропилы, облегчающие старт трещины?). В результате испытаний показано, что сжимающая часть цикла оказывает существенное влияние на da/dN , и предположение о возможности учета только растягивающей части цикла в расчетах ресурса приводит к неконсервативным оценкам. Для описания этого влияния предложено расширить диапазон использования формулы Формана и на случаи с $R < 0$.

В качестве замечаний к этому разделу следует отметить, что на графике рис.16 в подписях к графику есть точки с $R = -1.5$, но на самом графике их нет. Хотелось бы также обратить внимание на то, что формула Формана в данном случае имеет явно ограниченный диапазон применения – если в ней фиксировать значение $K_{I\max}$ и увеличивать сжимающую часть цикла, то влияние сжатия на скорость роста трещины будет монотонно увеличиваться – так ли это? По мнению рецензента, эффект влияния сжимающей части цикла связан с наличием диапазона между значениями K при полном открытии трещины (K_{opening}) и при полном ее закрытии (K_{closing}), первая величина, действительно, близка к 0, вторая – соответствует определенному сжатию. В этом случае влияние сжатия выходит на

насыщение, и более корректный характер имеет представление da/dN в виде,

полученном сотрудниками ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»: $da/dN = C \left[\frac{\Delta K_I}{1 - r \cdot \lambda} \right]^m$

где при $R < 0$ $\lambda = 0.77$. Тогда получим, что даже при $K_{\min} \rightarrow -\infty$ эффективный размах напряжений не будет больше, чем $K_{\max}/0.77$.

Вторая глава посвящена исследованию циклической трещиностойкости при наличии остаточных сварочных напряжений (ОСН). Экспериментальные исследования проводились на образцах, изготовленных из натуральных сварных соединений, а результаты обрабатывались с использованием полученных во второй главе данных. Для расчета вклада ОСН в коэффициент асимметрии R_K и определения величины коэффициента интенсивности напряжений $K_{I_{св}}$ использован метод весовых функций и замеры остаточного раскрытия трещины на поверхности образца при отсутствии внешней нагрузки под действием ОСН. Автором применены две методики:

- метод определения остаточного раскрытия трещины $\delta_{ост}$ при непрерывном росте усталостной трещины на стадии полной разгрузки;
- метод определения $\delta_{ост}$ при пропиливании металла сварного соединения тонкой фрезой.

Эксперименты проведены для сварных соединений с К-образной и щелевой разделками шва. По полученным значениям $\delta_{ост}$ восстановлены значения $K_{I_{св}}$ как функции относительной глубины трещины. Эти данные можно считать уникальными, поскольку до настоящего времени известные процедуры учета ОСН при анализе ресурса конструкций базировались исключительно на результатах численных исследований МКЭ, достоверность которых требует проверки.

По данному разделу в качестве замечания можно высказать недостаточную информативность описания вариантов эксперимента. Что такое «наружная» и «внутренняя» стороны листа? Было бы правильнее различать стороны по последовательности заполнения разделки сварного шва, что можно было бы видеть на макрошлифе.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований изменения упруго-пластических свойств материала после предварительного пластического деформирования, и расчетных исследований влияния этих

изменений на нагрузку потери устойчивости. Автором применен т.н. «метод зондирования» для получения большого объема информации по изменению предела текучести обратного знака на ограниченном объеме испытаний. Это позволило рассмотреть широкий диапазон изменения прочности судостроительных сталей и изучить общие закономерности проявления эффекта Баушингера на низколегированных сталях. Показано, что выход на насыщение по этому эффекту наступает при деформациях порядка 4%, и уже при деформациях около 1% падение предела текучести является существенным. Замена статического нагружения циклическим влияет на эффект крайне незначительно, вплоть до количества циклов, равного 0.5 от разрушающего – определяющим фактором является деформация на первом полуцикле.

Автором совершенно справедливо отмечено, что изучение эффекта только по величине падения предела текучести недостаточно - фактически меняется вся диаграмма деформирования. Поэтому вполне обоснованно в качестве второй изучаемой характеристики использован касательный модуль упругости. Получено, что при нагрузке обратного знака он монотонно уменьшается с увеличением предварительной деформации – то есть фактически предел пропорциональности при обратном нагружении отсутствует при любой деформации.

Далее автором выполнен расчетный анализ влияния изменений касательного модуля упругости на потерю устойчивости оболочки в варианте предварительной равномерной деформации растяжением (на примере экспандированной трубы), и при холодной гибке оболочки. Результат, полученный в первом случае, сам по себе интересен, но практическая его значимость спорна – необходимо принимать во внимание, что реально данные по прочностным характеристикам трубы получают заводом-изготовителем после экспандирования. При этом, как правило, используются полнотолщинные образцы, и здесь появляется еще один аспект для анализа – эти образцы почти всегда вынужденно подвергаются правке перед испытаниями! Следует также учитывать, что (именно по причине утраты предела пропорциональности металлом формуемой трубы) современные стандарты определяют предел текучести по допуску 0.5% полной, а не 0.2% остаточной деформации.

Результаты же, полученные для учета операции холодной гибки, крайне интересны и, по мнению рецензента, должны найти отражение и в нормативных документах по расчету прочности. Еще больший интерес представляет учет этого

фактора для штамповок, произведенных методом холодной деформации, и это должно быть предметом дальнейших исследований.

По этому разделу имеется следующее замечание: автор пишет, что оценка влияния эффекта Баушингера на устойчивость производится в рамках «известного приема замены исходного модуля нормальной упругости приведенным модулем». Хотелось бы иметь ссылку на источник этого приема. Также нет ссылок на таблицу 1, стр.88, остается неясным - получена она автором или это известные результаты?

Несмотря на ряд сделанных замечаний, необходимо в итоге заключить, что **диссертационная работа Нигматуллина В.И. является законченным научным исследованием**, направленным на решение комплекса практически важных задач в области прочности и строительной механики судокорпусных конструкций. Реализацией исследований является разработка новых методик испытаний (ИМЯН 32-372-10 МИ, ИМЯН 0302.01-01, ИМЯН 32-407 -14 МИ), уже нашедших применение в рамках проведения Программ межведомственных испытаний новых конструкционных сталей. Работа содержит ряд принципиально новых теоретических представлений о развитии усталостных повреждений в сварных соединениях и изменении прочностных характеристик материалов при различных вариантах предварительного деформирования. Автореферат и публикации автора достаточно хорошо отражают содержание работы. Диссертация изложена ясным языком, практически не содержит ошибок и опечаток.

Работа полностью соответствует специальности «Теория корабля и строительная механика», удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор заслуживает присвоения степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,

д.т.н., доцент

Подпись Ильина А.В. удостоверяю:

Заместитель Генерального директора

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей».

д.т.н., проф.



Ильин А.В.

Мальшевский В.А.