

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

С.В. ПЕТИНОВ

МЕХАНИКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ
СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Утверждено советом института
в качестве учебного пособия

Ук 7580



Ленинград
1985

УДК 620.12.011:539.4

Петин С.В. Механика усталостного разрушения судовых корпусных конструкций: Учебное пособие. Л.: Изд.ЛКИ, 1985, 119 с.

Учебное пособие содержит основные сведения о процессе разрушения ряда судовых корпусных материалов и конструкций при переменном нагружении, а также краткую характеристику методов предварительной оценки долговечности и условий внезапного разрушения конструкций судового корпуса.

Пособие предназначается для студентов специальностей "Динамика и прочность судовых машин и конструкций", "Судостроение и судоремонт", изучающих дисциплины "Механика разрушения судовых корпусных конструкций", "Прочность корабля". Может быть полезным для слушателей ФПКП Ленинградского кораблестроительного института и инженеров, занимающихся исследованиями прочности и проектированием конструкций судовых корпусов и морских сооружений, а также иных металлургических конструкций, подвергавшихся действию переменных нагрузок.

Ил. 63, список лит. - 26 назв.

Рецензенты: О.Е.Литов, А.Г.Макаров

© Ленинградский ордена Ленина
кораблестроительный институт,
1985

Введение

Усталость металла относится к числу внешних факторов, страдающих набор пренебрежимых размеров элементов конструкции, в частности, корпусов судов и морских сооружений. Усталостные повреждения - трещины чаще других возникают в конструкциях, а хотя высокая усталость очень редко бывает причиной катастрофических разрушений, трещины приводят к нарушению эксплуатации элементов и вызывают необходимость ремонта конструкций. Процесс разрушения конструкции, как правило, сложен, и усталость играет в нем важную роль: например, небольшая трещина может резко снизить сопротивляемость элементом сжимающим силам и привести к непредвиденной потере устойчивости, весьма опасной для конструкций с высокой степенью статической неустойчивости; минимальная трещина усталости может оказаться достаточно эффективной для старта внезапного разрушения при благоприятных для этого условиях.

Опыт проектирования и эксплуатации судовых конструкций показывает, что традиционные методы проектирования усталости, направленные на предотвращение усталостных повреждений, с развитием судовой техники, повышением ответственности ее эксплуатации, технологией и экономической ответственности становятся недостаточными и избыточными. Все более осознанной делается необходимость разработки и практического применения методов расчетного проектирования усталости судовых корпусов и конструкций морских сооружений на полный ресурс с учетом в явном виде признаков усталостного повреждения.

Основой для этого служат достижения строительной механики корабля и исследования внешних воздействий на судовые корпуса и конструкции морской техники, разработка высокоэффективных методов расчета деформирования конструкций, а также достижения отечественной и зарубежной научной дисциплины - механики разрушения.

Оформлялся как самостоятельная научная и учебная дисциплина многими годами до сих пор назад и применялись объяснять причины появления крупных разрушений в технике, механика разрушения быстро расширяет свои "территории", так что естественно возникает целесообразность специализации, охватывающей проблемы разрушения и прочности материалов и конструкций в судостроении. Однако даже при этом круг вопросов, представляющих интерес для судостроения, настолько широк, что методически дальнее и достаточно содержательное изложение его проблематично. Более того, опытные данные о сопротивлении материалов и конструкций извлекшему разрушению и реальному переменному нагружению все еще ограничены и не имеют систематического характера, несмотря на многочисленные экспериментальные исследования и громадный накопленный фактический материал. Хотя в прошлом предпринимались попытки систематического изложения вопросов разрушения материалов и конструкций в судостроении [17], тем не менее в технической и учебной литературе по прочности судовых конструкций до сих пор нет обобщенных материалов, которые обеспечивали бы потребности расчетного проектирования конструкций судов и морских сооружений, в том же учебной работе.

При подготовке настоящего учебного пособия одним из основных работ было определение в какой-то мере охватить указанные проблемы. Специфика учебного издания и ограниченный объем его потребовали отбора материалов, извлеченных прежде всего из равнинных задач учебного характера. Основой послужили материалы предшествующих - учебного пособия [17], опыт преподавания дисциплины "Механика разрушения судовых конструкций" на кораблестроительном факультете ВУЗ, а также результаты новейших исследований в рассматриваемой области.

В пособии основное внимание сосредоточено на характеристике физических аспектов устойчивости судовых материалов и конструкций в связи с особым значением устойчивости для определенных районов конструкций, построения методов расчетного анализа stability этого процесса. Обсужден также немаловажный вопрос о том, как объясняется отсутствием в настоящее время достаточно универсального критерия и трудности предельных рас-

четным путем Вязьминского разрушения сварной конструкции. Включены некоторые данные о концентрации напряжений в тупых углах корпусных конструкций, но изложение ограничено в Справочнике [1], но необходимым для обеспечения учебной работы. Показаны направления использования методов расчета устойчивости для определения теоретических коэффициентов концентрации напряжений, по которым возможно изложить геометрии наиболее ответственных деталей углов корпуса, соответствующих наиболее частых расчетных проектирования конструкций судов и морских сооружений. По сравнению с предшествующим изданием содержание объема пособия достигнуто благодаря исключению раздела, посвященного вопросам монотонного деформирования некоторых конструктивных сталей и алюминиевых сплавов.

Материалы главы 5 составлены при участии С.А.Резина.

КРИТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ И КОНДИЦИОНАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

1.1. Критерии расчетного состояния судовых конструкций

Когда говорят о прочности конструкций, то рассматриваются критерии, фактически смысл которых более или менее совпадают:

Равенство номинального напряжения предельной текучести материала; предполагается, что это условие для конструкции, состоящей из тонкостенных элементов, означает изменение формы сооружения вследствие развития микроструктурных деформаций в объеме конечных областей конструкции в состоянии при растяжении и сжатии;

Равенство номинального напряжения обгону для критического, что означает потеря устойчивости силми элементов конструкции, также в масштабе сооружения или его характерных размеров.

Прежде, такое соотношение представляется о разрушении конструкции не только соответствует действительности, поскольку фактически развитие разрушения может происходить со скоростью, однако этот использованная норма прочности, основанная на этом представляется, дала основными получить двукратные значения технологические решения.

Примерно четверть века назад устойчивость была признана основной проблемой для судостроения, в стали разработаны критерии общей прочности судовых корпусов, ограничивая роль устойчивости при назначении размеров основных элементов конструкции судового корпуса.

Важные особенности устойчивости - избирательная, существенно локальный характер начала разрушения, наступающего в определенных областях сооружения с местным изменением напряжений, у тех называемых конструктивных или конструктивно-технологических конструктивных. Следовательно, возможность "выхода" разрушения зависит не только от номинальной напряженности конструкции, как при изменении формы вследствие пластического деформирования или при потере устойчивости, но и от особенностей проекта конструкции в конкретных особенностях его исполнения.

Означая, что проектирование конструкций судовых корпусов в меритках содружливой должно опираться на фактические проявления напряжений, если так же, как это выполняется при учете других видов разрушения, другие предельные состояния конструкции. Поскольку фактическим проявлением напряжения от устойчивости является трещина, то количество или развитие трещин до определенных размеров следует считать в принципе расчетного состояния конструкции. Уточнением этого состояния, однако, имеют особенности, состоящие примерно в следующем.

Скорость распространения трещин при весьма развитой напряженности конструкций судового корпуса даже в определенных условиях возможна и появление трещины могло бы не представлять для судна немедленной опасности. Однако из опыта постройки и эксплуатации судов, опыта исследования свойств конструктивных сталей известно, что при определенных условиях судовому корпусу угрожает опасность внезапного, крупного разрушения. Эти условия: высокая температура конструкции, повышенная концентрация материала разрушения в районах концентрации и обломки характера напряжений, присутствие в материалах и соединениях структурных составляющих, способствующих снижению сопротивляемости разрушению крупнозернистых структур и локализованное металлы и особенно в зоне сплавления, сварки, не обязательно жесткой, уровень напряженности конструкции, состояние сварочных напряжений, развитие локализованного металла в сплавленной зоне, наличие, присутствие в конструкции дефектов содержания и, по-видимому, наличие начала устойчивого разрушения у этих дефектов. Последнее весьма существенно, так как у многих трещин существенно снижается способность материала к пластическому деформированию при температуре из-за возможности обломки растяжения и "заработки" пластического ресурса материала.

Возможность внезапного разрушения от трещины устойчивости или технологической трещины в сварном соединении, которая вряд ли обнаруживается визуально, определяет своего рода крайности в изменении расчетного состояния конструкции. Таким в этом случае должно быть начало распространения трещины, т.е. короткая фаза зарождения и вид трещины. Если, что это определение относится к конструкции, которая может находиться в такой температур, при которой происходит явление сопротивления разрушению, критическому оцениваемому

по результатам динамических испытаний на жесткой опоре (Барна, Москва или станок для снятия K_{TDC}). Такой же подход возможен при установлении расчетного соотношения конструкций, наблюдение за которыми во время эксплуатации затруднено или невозможно (например, конструкций, работающих в условиях отдаленности высокой степени статической неопределенности). Разрушение полостей при распространении трещин усталости может происходить в результате разрушения отдельного элемента (Примером может служить гибель верховной шпангоута "Александр Шашкина" во время аварии в апреле 1982 г. во-вз усталостного разрушения герметизированной распорки, возникшего от дефекта сварного соединения).

Конструкции, не имеющие непосредственного контакта с наружным воздухом, как правило, не подвержены опасности внезапного разрушения, за исключением ненадежных конструкций рефрижераторов. Однако повреждения возникают, что во внутренних деталях судового корпуса в наружной обшивке или в терпящих трещины усталости подчас достигают значительных размеров, и вот примеров, когда они привели бы к разрушению корпуса. Иногда такие трещины обнаруживаются, если вершина попадает в малонагруженную область детали, податливость которой и вид деформации не изменяются при расчете повреждений; возможно и терпящее влияние полей остаточных сварочных напряжений. Повреждения обследуемого вида наблюдаются в стеньгах рамки стоек у верхов для прохода балок напора, в шпангоутах осевых, в шпангоутах, ограничивающих толстые цистерны, и т.д. Обычно трещины в малонагруженных местах при возрастании предельной опасности в связи со сдвигами возможны поодиночке:

- по мере возрастания трещины могут привести к освобождению кромок сварки пластин или планок, находящихся под действием касательных напряжений, в результате чего возможна непредвиденная потеря устойчивости несущих элементов, например, стенок флюров или рамки шпангоута. При значительной степени статической неопределенности "определенными" усталостно-прочностными параметрами в разрушении конструкции (как это случилось с несущими конструкциями надводного яруса моста Александра Невского в 1982 г.);

- стеньги трещины недопустимы из-за нарушения герметизации яруса, толстых цистерн, танков для перевозки неф-

тепродуктов, сжиженных газов и т.д.];

- необходимость решения конструкций, податливых усталостным повреждениям, существенно складывается из автоматической и темпестивной эффективности сооружения.

Обсуждая трещины усталости в конструкции как возможный признак расчетного состояния, необходимо учитывать совокупность расчета подрастания повреждений. Как показано ниже, в целом такая возможность обеспечивается методами анализа разрушения в соответствующих сварных соединениях, однако при этом возникает более или менее серьезные затруднения. Наиболее сложное учесть влияние остаточных сварочных напряжений на подрастание трещин. Несмотря на то, что теоретически эта проблема вполне удовлетворительно решена [10], в ряде примеров расчета распространения трещин в полях остаточных напряжений с помощью метода конечных элементов, результаты которых приводятся в данном отчете, практически определяли поля остаточных напряжений для реальных уже конструкций судового корпуса и расчеты разрушения ими проблематичны.

Сказанное относится к полному определению практически длины трещины в одной конструкции, переосмыслит ряд соединений. Однако если предположить возникновение разрушения в зоне концентрации напряжений в сварном соединении, то можно основываясь считать, что благодаря концентрации остаточных напряжений разрушается в соединении и определенной части конструкции под действием переменного напряжения. Это позволяет вести расчет усталостной долговечности без учета остаточных напряжений в пределах трещины трещины порядка расстояния до ближайшего сварного соединения. Это обстоятельство должно быть приняты во внимание при выполнении расчетов длины трещины.

Важно неоднократно подчеркивалась решающая роль концентрации напряжений в процессе усталостного повреждения конструкции. Поэтому целесообразно рассмотреть примеры напряженности типичных ярусов судовых корпусов в морских сооружениях при типичных видах их деформации в конструкции.

1.2. Концентрация напряжений в титановых узлах наружных конструкций

Деформация судового корпуса, отдельных его конструкций и конструкций морских сооружений под действием гидро- и аэродинамических давлений, а также других воздействий, довольно сложна. Например, продольные полудре элементы деформируются в осевом направлении при его движении по волнениям испытывают осевые деформации в результате пространственного изгиба корпуса и возникают вместе с перегибками и по отношению к нему. Заметно, что эти процессы протекают синхронно, но не являются максимум перекаленных видов деформаций одновиты по фазе. Как еще бортовые конструкции деформируются при изгибе корпуса в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также под влиянием переформирования суд и прочими корпус. Прямая может видеть в деформации каждого узла конструкции, значит, ее многокомпонентный характер - это общее явление.

Для осуществления расчетного анализа принято выделять типичные виды деформации деформации корпуса и для них определять в последствие характер местной напряженности, правда, дальнейшее описание результатов таких деформаций не всегда совпадает.

Концентрация напряжений в судостроении по-прежнему довольно много работ: часть результатов исследований помещена в справочники по строительной механике корабля [1] и [2]. Но чаще наиболее значительной проблемой при концентрации напряжений можно назвать [4], [5], [6] и другие. Однако систематического и достаточно полного коллоквиума данных для характеристики узлов конструкции и видов их деформации, которые необходимы для расчета прочности при переменном нагружении, нет. Поэтому ниже дается обзор таких материалов, составленных с учетом и включением настоящего издания и составленных по данным, полученным в настоящее время.

1.2.1. Концентрация напряжений в конструкциях палуб в районе вырезов

Примеры, относящиеся к размерам вырезов в палубе, округленные углы относятся к различным факторам, определяющим величину напряжений; заметная роль в этом принадлежит также особенностям конструкции комингсов, соотношению толщин уча-

стиев палубы и вырезов.

Концентрация напряжений у вырезов в палубе коллоквиума в основном при осевой деформации вдоль диаметральной плоскости судна. При этом вырезы в строении [13] (где рис.7.6 соответствует относительному раскрытию палубы $b/B = 0,4$, рис. 7.7 - $b/B = 0,8$ и рис.7.8 - $b/B = 0,6$) и в килге (5), поэтому здесь эти материалы не концентрируются, и поэтому рекомендуется обратиться к названной литературе.

1.2.2. Конструкция бортов, продольных переборок и отсеков надстроек

Концентрация напряжений у отверстий в этих конструкциях может быть определена, как и для палубы у вырезов, при изгибе корпуса судна в горизонтальной и вертикальной плоскостях (в последнем случае надо обратить внимание на определение коэффициента концентрации напряжений, см./П/1, с.68). Особенности вертикальных отсеков судового корпуса состоят в том, что для них в большей мере, чем для палуб, вырезы деформируются иначе. Другая особенность черт рассматриваемых конструкций - отверстия в них связаны с продольной границей конструкции отверстия в борту - в палубе, что обуславливает наличие дополнительной жесткой деформации участка между отверстиями и границей палубы. Отверстия в надстройках часто располагаются у торцевых отсеков, что может заметно повлиять на податливость конструкции и концентрацию напряжений.

Коэффициенты концентрации напряжений у отверстий в продольных отсеках корпуса, связанных с продольной границей конструкции, определяются по формуле:

$$K_0 = K_0^{(0)} K(r_0, \theta_0),$$

где $K_0^{(0)}$ - коэффициент концентрации напряжений у прямоугольного отверстия в бесконечной пластине, углом которого округлен по дуге округлости. эту величину при отверстиях заданных пропорций можно найти в [1] по графику рис.7.1 - 7.3. Для круглых отверстий извлеченный коэффициент K_0 , с помощью которого определяется величина "эквивалентного изгиба" участка между отверстиями отверстия и границей конструкции, можно использовать графиками рис. 1,4 (расстояние и изгиб в плоскости пласти-

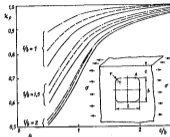
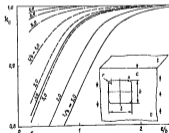


рис. 1. Показаны для расчета концентрации напряжений при растяжении (а) и при действии переменной нагрузки (б) и кручении (в):

— $\eta/b = 0,1$, --- $-0,2$, - · - · - $-0,3$



ны) и графиками (рис.1,Б (одна из плоскостей).

1.2.3. Концентрация напряжений в узлах внешнего соединения балок продольного набора

Схема узла внешнего соединения балок продольного набора у поперечной переборки изображена на рис.2. Типичные деформации для такого узла: продольная, вызванная обжимом судна и - в меньшей мере - изгибом переборки, а также поперечная, обусловленная изгибом балок набора между отсеками в результате давления воды волны на внешние гребки. Как видно по распределению относительных напряжений для одного из вариантов узла конструкция судна на подводных крыльях, приведенных на рис.1, наиболее напряженными оказываются: при осевой деформации - участки срезовых по дуге поверхности стенок ребра под переборкой, часть кромок ячеек у соединения с соседним ребром со стороны переборки и зона соединения у стенок ячеек на соседнем ребре с противоположной стороны; при поперечной деформации - последний участок также оказывается зоной концентрации напряжений. Этот участок стенок ячеек отличается тем, что в зоне повышенной напряженности находится сварное соединение. Помимо того, что сварное соединение имеет



рис.2. Узел внешнего соединения балок набора у поперечной переборки

в латераль высоконапряженной части конструкции - статистическую и механическую разнородность, создает статистическое напряжение. Деформирование цилиндрического мотыля является от узла к узлу и при этом существенно определяет местную концентрацию напряжений. На рис. 4 приведены результаты расчетов

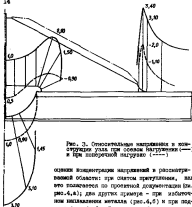


Рис. 3. Относительные напряжения в концентраторах напряжений в конструкции улова при осевой нагрузке (—) и при поперечной нагрузке (----)

области концентратора напряжений в рассматриваемой области: при осевой нагрузке, над его значением по проектной допустимости (см. рис. 4, а); для других случаев - при максимальном напряжении металла (рис. 4, б) и при подравне (рис. 4, в). Для расчетов были использованы плоские элементы участков, вытесненные на одном из ограничивающих судов, в расчеты выданы для осевого нагружения улова. Как видно из этих данных, в действительных условиях концентраторы напряжений выносятся в довольно широкие пределы, определяя и существенный разброс утомлительной долговечности улова одного и того же корпуса, как это показано в главе 2.

1.2.4. Косые напряжения в стенках разрывных связей у шварса для прохода балки набора

Участки разрывных связей, содержащие нарезки для прохода балки набора, относятся к числу наиболее высоконапряженных участков судовой конструкции; особенно это касается конструкций фальшбортов крупных танкеров, где часто находят трещины усталости.

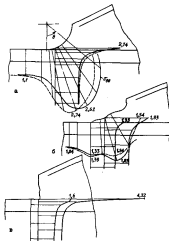


Рис. 4. Коэффициенты концентрации напряжений для участка улова у стенок связи разрывных связей: а - проектная форма; б - металл максимального металла; в - подравне

Наиболее опасными оказываются углы, находящиеся у продольных переборков, т.е. у опор флага, где возникает большое касательное напряжение под действием переориентирующих сил. Расположенные трещины и их траектории в стенке флага (в "толстой" части вертела, у соединенной стенки флага и балки набора, у диаметральной обшивки, рис.5) указывают на наличие роли в формировании местной напряженности углы двух видов деформации: перекоса план, содержащего угол, под влиянием переориентирующих сил и деформации от усиления инерционного балки набора и флага, передеформации в основном за их соединением (см. рис.5).

На рис. 5 изображены также коэффициенты концентрации напряжений в отдельных стенках флага, перпендикулярная контуру вертела, для трех вариантов формы вертела: стандартный, (а) и (б), и вертела усложненно-тонкостенной формы (рис.6, в). Эти данные получены при двух крайних видах видов деформации участка флага с вертелом. Как видно, при стандартных формах вертела коэффициенты концентрации напряжений совпадают наиболее. В толстой части вертела и при сдвиговой деформации стенки флага достигают величины порядка 16! Местные напряжения у соединенной стенки флага и диаметральной обшивки определены на рис.6, а и б, в постраходной, так как методика измерения ее по-прежнему проводится по мере деформации в неопределенной области сопряжения. Размеры поврежденной судовой конструкции показывают, что рассмотренные области, как и остальные

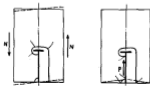


Рис. 5. Стенка деформации стенки правой обшивки и места образования трещины (а) и (б)

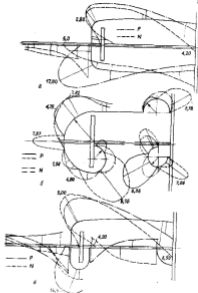


Рис. 6. Вид линии возможных напряжений у стенки: стандартной (а, б) и усложненно-тонкостенной (в) вертела

VU ZFRD



части, становится возможным для усталости. Для решения проблемы прочности усталости при переменном нагружении надо найти такие конструктивные решения, при которых концентрации напряжений была бы управляемым элементом. На рис. 6, б можно видеть пример форм отверстий, при которых концентрации напряжений зависят в основном от геометрии отверстия, а не от технологии. "Нагружение" в головной части стержня распределяется равномерно радиусом отверстия контура отверстия, а максимальные местные концентрации напряжений у острия отверстия получается благодаря нагрузке.

Приведенные данные позволяют найти размеры местной напряженности участка стержня для любого усталости. Коэффициент концентрации напряжений, вычисленный реакцией балки набега, определяется отношением $K_1 = \sigma_1^{(1)} / \sigma$, где $\sigma_1^{(1)}$ - деформация в σ - точке центра, а σ - усталостная номинальная деформация, $\sigma_1 = P/\Sigma \sigma$, P - реакция комбинированная стержня флора и балки набега, σ - площадь сечения стержня флора.

Концентрация напряжений при сдвиговой деформации определяется аналогично $K_2 = \sigma_2^{(1)} / \sigma$, где $\sigma_2^{(1)}$ - местная деформация; усталостная номинальная деформация $\sigma_2 = N_2/\Sigma \sigma$, N_2 - перераспределенная сила в месте расположения усталости.

Здесь понятие обобщенного коэффициента концентрации напряжений, которым можно характеризовать местную напряженность участка усталости при сдвиговой обилии деформации. Пусть характерное значение перераспределенной силы для данного усталости $N_1^{(1)} = N_1 + 0,5 P$, где N_1 - значение перераспределенной силы в сечении по ширине флора (рамой сечения), где располагается рассматриваемый усталости. Относительно равномерное напряжение усталости в номинальному расчетному напряжению, рассчитанному по величине характерного значения перераспределенной силы $N_1^{(1)}$, получим выражение для обобщенности коэффициента:

$$K_1^{(1)} = (K_1 + K_2 P / \Sigma N_1) / (1 + P / \Sigma N_1),$$

где i - номер усталости, для которого вычисляется $K_1^{(1)}$.

Расчеты по этой формуле показывают, что обобщенный коэффициент концентрации напряжений заметно увеличивается по мере сужения усталости в сторону сечения рамы стержня; это вполне согласуется со статистическими данными о сдвиговых усталостях.

1.2.3. Местные напряжения в углах соединения цилиндрических оболочек

В конструкциях морских сооружений, в частности, плавучих самоподъемных и полупогруженных буровых установках широко применяются в качестве наружных конструктивных элементов трубы и цилиндрические оболочки. В соединениях таких элементов при различных видах деформации (рис. 7) одна из оболочек оказывается в несимметричном положении, так как сопротивляется нагрузке в направлении, соответствующим максимальной жесткости, - нормально или под углом к образующей. Несбалансированная жесткость элементов в соединении приводит к местному повышению напряжений в соединительной детали. Так, в Т-образном соединении стержня и распорки полупогруженной установки коэффициенты концентрации, определяемые по отношению к номинальному сечению деформации распорки, могут достигать значений порядка 20 и более. Очень высокий уровень местной напряженности может способствовать преждевременному разрушению комбинированной трубы усталости в соединении, опасном для конструкции с номинальной стержневой статической несреднемерностью.

Известно множество параметров соединений трубчатых элементов, отличающихся расположением деталей, подкреплениями; полней сведения данных о концентрации напряжений для них нет. Ниже рассматривается только Т-образное соединение, для которого в последние время получены наиболее подробные сведения о местной напряженности.

Установлено, что в таком соединении наиболее высокие напряжения при стандартных видах нагружения возникают в "вертикальной" и "соединительной" точках (см. рис. 7) на соответствующих сечениях стержня. Стандартные виды нагружения - осевое нагружение распорки, ее поперечный в плоскости усталости и "на плоскости" усталости для некоторых конструкций вертикальных может быть именно радиально распределенное давление.

Анализ экспериментальных данных показывает, что для стержневых местной напряжений в критическом сечении и его ориентации можно использовать асимметричную теорию оболочек Кривоного, основанную на приведении к виду об обилии балки на упругом основании, а гипотезу о радиальной жесткости контура перераспределенных оболочек. Коэффициенты концентрации напряжений в критическом сечении стержня при осевом нагружении распорки, ее попер-

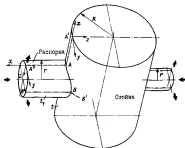


Рис. 7. Схема узла соединения цилиндрических оболочек и стандартные виды нагружения узла
 $A' = A = K'$ - внутреннее сечение, $B' = B = B''$ - соединяемое сечение

роте в плоскости узла и при внешнем давлении можно рассчитать по формуле:

$$K_p = 6\mu(s) \exp(-\alpha(s)(s)(r-A) \sin \alpha x - A \cos \alpha x) / \alpha \sigma_0 t^2,$$

где $A = 0,5(1 + (s_0 t_0 / r t)^2) (t/t_0)^2$; $\alpha(s) = 1,285(r/s)(s)t^{0,2}$ - параметр оболочки (толщина); $\mu(s)$ - погонное усилие вращательная, направленное по нормали к оболочке с одной стороны относительно о деформированности контура; s - координата точки, отсчитываемая по длине соединяемой оболочки от точки A (см. рис. 7). Расчеты K_p по приведенной формуле дают весьма удивительные результаты: при $\alpha/r \leq 10$; за эти же пределы, однако, концентрации напряжений не представляет проблемы.

Местные повышенные напряжения непосредственно в соединении оболочек зависят от конкретной геометрии сварного соединения и может учитываться введенным поправкой, характеризующей концентрацию напряжений, определенную формой максимального материала.

2.1. Особенности деформирования металлов и сплавов при циклическом нагружении

Циклическое нагружение рассматривается как простейшая модель нагружения в действительных условиях, и чтобы понять и описать явление усталости, необходимо учитывать обратимость и асимметричность реакции материала на циклическое нагружение.

Обычным опытным методом циклического нагружения, изготовленного из малоуглеродистой стали, который помещен в латунный испытательный станок и под действием пневмоавтоматического устройства можно может рассматриваться или симметрично; проблему усталостности образца можно будет считать несущественной.

Предполагая, что первый этап нагружения заканчивается в состоянии, соответствующем точке С диаграммы (рис. 8). Затем следует разгрузка CD и повторное расширение DE, продолжение которого за точку E практически повторяет путь деформирования при непрерывном нагружении. Разгрузка от точки F диаграммы и последующее нагружение GH подтвердили бы универсальность зависимости: повторная разгрузка и вновь расширяется образцы, не получив бы обычной диаграммы расширения. Следует, что в таком опыте обнаруживается увеличение способности материала деформироваться упруго при переходе в область упрочнения, т.е. за точку B диаграммы. Деформации и нагружения, соответствующие упругому поведению материала, в этой области увеличивается, наблюдается деформационное упрочнение, так что $\sigma_0^{(2)} > \sigma_0^{(1)} > \sigma_0^{(0)} = E_0$.

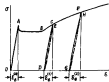


Рис. 8. Деформирование при повторных разгрузках

Последние опыты также можно. Допустим, что после разгрузки на точку B диаграммы (рис. 8) образец вновь нагружается, но

Последние опыты также можно. Допустим, что после разгрузки на точку B диаграммы (рис. 8) образец вновь нагружается, но

уже указанным другим способом, сжимаемым, и деформированном по-другому, как показывает опыт, по пути CD . Для этого, реакцию материала на действие нагрузки другого знака представляем отклоненной от исходной; от реакции при обратном направлении нагрузки.

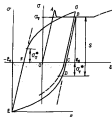


Рис. 9. Деформирование при перемене знака нагрузки

свойств материала.

Рассудим образцы из состояния, характеризующего точкой E диаграммы, и покажем решение его в координатной системе до деформации, соответствующей первоначальному. Получим при этом диаграмму EFG для такого материала, как малоуглеродистый сталь, практически соответствующую диаграмму $BIDE$, но только размерами не 100° по оси абсцисс и 100° по оси ординат, а иначе, последующая нагрузка и растяжение, т.е. дальнейшая нагрузка материала с переменной силой нагрузки, неизменно изменяет характер диаграммы по сравнению с участком $BIDE$. Два раз системы имеют особенности результатов такого опыта:

- придем пропорциональности при нагрузке со старой силой нагрузки в упругоэластической области рассуждений по сравнению с исходным пределом текучести, так что $\sigma_1^* < \sigma_0^*$; это явление было обнаружено и исследовано Н.Дарвингером в 1861-1864 гг. и называется эффектом его имени;

- реакция материала из упругоэластического состояния и нагрузка противоположного знака в упругоэластическое состояние превращает исходный материал в металл с осевшими

внутренними напряжениями другого знака представляем отклоненной от исходной; от реакции при обратном направлении нагрузки. Если же мы скажем, что "упругий" участок диаграммы ED сдвигается вертикально, а соответствующее ему напряжение ED^* значительно ниже предела текучести. Реальная часть диаграммы DE по которой идет путь диаграммы и следовательно о направлении некоторых точек

отличной диаграммы деформирования, который не имеет значения нагрузки.

На основании анализа диаграмм деформирования, полученных в упругоэластической области при смене знака нагрузки, другой немецкий исследователь Г.Мазинг (1886г.) предположил, что участок упругой деформации BCE (см. рис. 9) можно характеризовать напряжением, примерно равным удвоенному пределу текучести ($2\sigma_0$), и для материала, не имеет никакой зависимости от нагрузки.

Вместо вертикальной зависимости нагрузки, диаграмма которой нагруженный металл строится по исходной кривой извлечением точки максимума нагрузки (σ на участке упругой деформации следует также считать максимума деформации). Этот принцип построения диаграммы, который мы назвали, удобен для аналитического анализа диаграммы и анализа напряжений и деформаций в действительности и применяется, когда нет прямых опытных данных (рис.10).

Последующие опыты показали, однако, что симметричные диаграммы деформирования по Мазингу выполняются только для сталей с весьма малым содержанием углерода. У обычных конструктивных сталей в области повышенной прочности имеют $\sigma < 2\sigma_0$. Правн построения участка упругой деформации по Мазингу не универсальны, как видно из примера стали, на диаграмме растяжения которой имеется линия текучести.

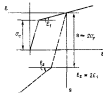


Рис.10. Построение симметричной диаграммы по Мазингу

2.2. Диаграммы циклического деформирования

Диаграммы, которые получаются при повторном нагружении в упругоэластической области с изменением знака нагрузки, на-

линейно упругой области (упругоупругого) деформирования или области упругого восстановления, циклограммы.

Циклограмма циклического деформирования обычно строится от точки разгрузки (В или D, рис.11) и характеризуется предельными напряжениями σ и деформациями, напряжениями σ_0 , соответствующими почти линейной части циклограммы, упругой ϵ_0 и пластической ϵ_p составляющими деформации. Пластическая часть ϵ_p является еще крайней веткой пластического расширения.

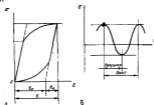


Рис.11. Циклограмма циклического деформирования

Для указанных характеристик циклограммы относятся к одной ее ветви, полученной на полцикла нагружения (см. рис.11), от точки разгрузки после нагружения одного цикла (от точки reversal нагружения) до точки разгрузки после нагружения другого цикла. При нагружении растяжения или сжатия, когда не происходит смены знака нагружения, в полцикла может быть нагружение или разгрузка, в период пластического расширения, если она образуется, относятся также к полциклам. Поэтому характеристики циклограммы представляют собой резонанс (характерные амплитудные значения) напряжений σ , деформаций ϵ , ϵ_0 и ϵ_p . Амплитудные значения этих величин на циклограмме указывают нагруженностью и тем же образом в данном случае не применяются.

Следует отметить, что в отличие от диаграммы однократного растяжения или сжатия, которая может служить устойчивой

и строгая характеристика любого материала, циклограммы циклического деформирования вообще не являются типичными универсальными свойствами металла, которые определяют бы общую зависимость между напряжениями и деформациями при циклическом нагружении. Реакция материала на циклическое нагружение в упругоупругой области оказывается довольно сложной и неоднозначной, хотя само циклическое нагружение представляет собой альтернативу колебл. реального эксплуатационного нагружения конструкций.

Сложность реакции материала в основном в том, что как зависимость $\sigma(\epsilon)$, получаемая на опытах, зависит от глубины циклического деформирования, которое происходит в результате циклического нагружения, в другом, циклограммы циклического деформирования, их характеристики зависят от номера полцикла нагружения.

Зависимость циклограммы от глубины циклического деформирования выражается в том, что различные части циклограммы не образуют одной прямой, по которой можно было бы проследить процесс деформирования материала при разных параметрах цикла нагружения. Так, при многократном нагружении амплитудной силой (при условии сохранения предельной деформации цикла $\epsilon_{max}^{(n)}$, рис.12) кривая предельности деформирования становится от прямой, полученной при испытании, в котором максимальная деформация была $\epsilon_{max}^{(0)} = \epsilon_{max}^{(n)}$. Отклонением устойчивые характеристиками циклограммы, как показывают исследования, могут считать противность линейного участка диаграммы, которая характеризуется резким изменением точек reversal нагружения, сдвигается циклограмма циклического деформирования (рис.12). Следует, что величину, равнозначную ϵ_p , включает иногда циклическое предельное пропорциональности в соответствии с построением Свистика, считая, что этот

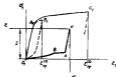


Рис.12. Зависимость циклограммы циклического деформирования

правле, выходящей при циклическом нагружении, при отсутствии разрыва с накоплением в ней максимальных деформаций металла.

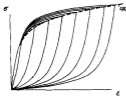


Рис. 13. Построение обобщенной диаграммы циклического деформирования

уровня нагружения.

При возможности свойства материала зависят от вида, амплитуды и частоты циклического нагружения: период — нагружения с максимальной частотой при растяжении и сжатии, но минимальной от сжатия к растяжению, — циклическое нагружение. Иногда этот вид испытаний называют еще испытаниям нагружением, однако при изучении распространения трещин установка такого нагружения оказывается способствующим интенсивному развитию разрушения, а с "малостью" рван не может быть. Поэтому в дальнейшем такой терминальной не пользоваться на другом. Заметим, что наиболее типичны случаи с гидравлическим сжатосовращением (гидроциклами) обычно создают именно циклическое нагружение. Другой вид испытаний: нагружение в малом диапазоне вылетом до того, как будет достигнута заданная величина деформации, установка делается для всего материала. Такой вид испытаний называют циклическим деформированием или, по своему вкусу, циклическим нагружением, и соотносят его не только с испытательными сжатосовращением и циклами с амплитудным управлением ("Историк", машины НИИ Арзамасского завода, "Историк", МТС и на другие). Они вида испытаний, как было отмечено выше, представляют собой простейшую модель реального случайного нагружения, которую применяют инженерное сообщество.

Зависимость диаграммы циклического деформирования от номера цикла нагружения и числа циклов от начала испытаний с фиксированными параметрами оценивается различиями у разных материалов, различиями у одной и той же материала при разных видах испытаний и при разных

тем типах конструкций судового корпуса.

Конструктивные материалы на их реакцию на циклическое нагружение или деформирование условно разделяют на циклически прочные металлы, циклически стабилизирующиеся и циклически разупрочняющиеся. Усталостные разрывы происходят от того, что в зависимости от параметров нагружения, величины вылета нагружения при циклическом деформировании один и тот же материал может охарактеризовываться в разных группах.

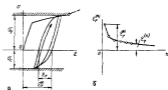


Рис. 14. Циклическое нагружение, циклически прочного материала

Вначале рассмотрим, однако, общий элементарный случай материала при циклическом воздействии. Предположим, что циклическому нагружению подвергается образец, изготовленный из эластичного сплава. Образец растягивается до напряжения σ_p (рис. 14, а), а затем сжимается до σ_c . При первом нагружении образуется пластическая деформация, а при первом разгрузке равен $\epsilon_p^{(1)}$, затем при последующих разгрузках и нагружениях до σ_p выделается величина пластического исторического. При этом, однако, в каждой точке не выделится и постепенно сужается от центра к центру, так что $\epsilon_p^{(n)} > \epsilon_p^{(n-1)}$ для n — числа последующих нагружений (рис. 14, б).

Пусть теперь такой же образец из эластичного сплава испытывается в условиях реального деформирования (рис. 13, в), он растягивается до σ_0 , как деформация его рабочей части достигает ϵ_1 , а затем разгружается и сжимается до деформации ϵ_2 , а такой режим повторяется в дальнейшем. При этом

оказывается, что максимальные напряжения в конце каждого полупериода нагружения (от точки разгрузки до начала следующего цикла в напорот) постепенно увеличиваются, так что $\sigma_2 > \sigma_1$ и $\sigma_{2n} > \sigma_{(n-1)}$. Связанная зависимость σ_n от числа полупериодов показана на рис. 15, д.

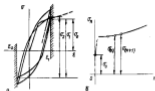


Рис. 15. Пластическое деформирование пластичного упругопрочного материала

Итак, в процессе нагружения образца, изготовленного из вязкого сплава, происходит развитие наряду с ростом пластического гистерезиса при циклическом нагружении как рост напряжений, увеличение сопротивления при циклическом деформировании. Оба эти процесса иллюстрирует циклическая истощенность материала и отражает его упрочнение от цикла к циклу. Поэтому такие материалы, в которых отсутствуют в некотором диапазоне сплавов, являются циклически упрочняющимися.

Другие материалы, например температурно-усталостные, приходящие в конструкциях в напряженном состоянии, могут сопротивляться повторному нагружению. При циклическом нагружении наряду с ростом пластического гистерезиса у этих материалов увеличивается от цикла к циклу и $\sigma_n > \sigma_{(n-1)}$ (рис. 15), а при циклическом деформировании

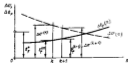


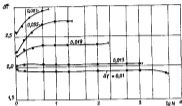
Рис. 16. Пластическая релаксация пластичного материала

уменьшается сопротивление. Такая реакция свидетельствует о циклическом разупрочнении и соответственно определяется граница циклически релаксирующего материала.

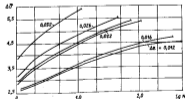
Промышленное положение между этими двумя группами занимает мартеновские и никельтитановые сплавы, а также некоторые алюминиевые сплавы, которые применяются для изготовления конструкций судовых корпусов. Для этих сплавов характерно некоторое изменение сопротивления при их протяжении небольшого периода от начала испытаний, когда на нескольких циклах. В дальнейшем как норма так и пластическое гистерезис при циклическом нагружении, так и размах напряжений при циклическом деформировании изменяются незначительно; поэтому такие материалы являются циклически стабилизируемыми.

На рис. 17 показана кинетика напряжений $\Delta T = \Delta T / \sigma_n$, где σ_n — предел прочности при растяжении, для сплава Ti-6Al-4V при циклическом деформировании — кручении толстостенных труб, а также кинетика остаточных нормальных напряжений $\Delta \sigma$ для алюминиевого сплава Al-6Si. Как видно, сплав Ti-6Al-4V при деформации имеет ΔT ведет себя как материал циклически стабилизирующийся, в то время как алюминиевый сплав проявляет циклическое упрочнение.

Важно было отметить, что динамическое упрочнение или релаксирование зависят от параметров цикла — заданных напряжений или деформаций, и еще в том же материале может проявиться в разных условиях различные свойства. Поэтому разрабатывая материалы по циклическим свойствам следует помнить как спецификацию по основному критерию, так и условия при эксплуатации в эксплуатационных нагрузках и конструкциях. Обобщая свойства судостроительных сплавов и сплавов, следует иметь в виду, что для в районах с высокой концентрацией напряжений в судовом корпусе, например, в узлах переборки балки набора в районах связей, или в конструкциях корабельных сооружений (например, в узлах соединения трубчатых элементов сварных колонн самоподъемных брандов устьевых, в узлах соединения стоек и распорок ПНУ) деформации во времени процесса эксплуатации весьма значимых изменений напряжений, возникающих в конструкции при эксплуатации. Разумеется, это утверждение справедливо только для областей концентрации напряжений у определенных отверстий, выемчатых размеров связей, а не у трещин или трещинообразных дефектов сварки соединений. Сна-



a



б

Рис. 17. Кинетика напряжений при циклическом деформировании стали 10ХСН (а) и сплава AMr-42 (б)

какие две величины обычно считают суммарными стали и некоторые алюминийевые сплавы материалами практически стабильно деформируются.

3.3. Практические грани получения диаграмм циклического деформирования

Было уже показано, что свойства материала колеблются при циклическом нагружении и деформировании. При этом видна необходимость, чтобы в рабочей части образцы формировалось однородное напряженное состояние простейшего типа. Удовлетворить отчасти эту потребность удается тем, в качестве исходного материала, поскольку при последующем нагружении состояние металла деформированного материала становится различным.

Однородное напряженное состояние можно получить, если выбрать для испытаний цилиндрический образец круглого сечения и подвергнуть его осевой нагрузке или деформированию; можно использовать трубчатый толстостенный образец и испытывать его при циклическом кручении с малыми моментами или до заданного угла. При этом, что только стенки образцы не превышают 0,1 его среднего радиуса, напряженно-деформационное состояние образца можно считать достаточно однородным, см. что указано А.Видан [16].

Для построения диаграмм циклического деформирования требуются одновременно шпиль и регистрировать количество циклов нагружения и деформации. С этой целью обычно используются двухкоординатные осциллографы — двухканальные телеоскопические с автоматической балансировкой мостов и плавящими.

Итак, малые усилия при циклическом растяжении-сжатии позволяют определять напряжения

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi d_0^2},$$

где d_0 — диаметр образца и F — нагрузка нагружения.

Поскольку кривые деформации можно найти совместно диаграмм циклического деформирования при разных циклических нагрузках. Затем можно построить, как совместно показано на рис. 13, объединенную диаграмму циклических напряжений и деформаций для данного материала, $\epsilon = \epsilon_1(\sigma)$ — при циклическом нагружении и $\sigma = \sigma_1(\epsilon)$ — при циклическом деформировании.

При кручении образца, изображенного на рис. 18, величина момента дает возможность определить поперечные напряжения

$$\tau = M_{кр} / W_p, \quad W_p = \pi(d_{вн}^3 - d_{вн}^3) / 16,$$

где $M_{кр}$ - крутящий момент; W_p - полярный момент сопротивления сечения трубчатого образца; $d_{вн}$ - наружный и $d_{вн}$ - внутренний диаметры рабочей части образца. Расположив образец деформацией вдоль, можно так же, как и при растяжении с осевым нагружением, измерить осевую деформацию $\lambda = \lambda_0 / l_0$ при кручении с заданным изменением $\Delta M_{кр}$ или $\tau = \tau_0 (\Delta M)$ при кручении с заданным углом закручивания.

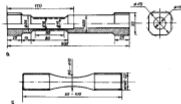


Рис. 18. Образцы для исследования пластических свойств материалов:
а - для испытаний при кручении; б - для испытаний при осевом нагружении

Измерения, проводимые на таких образцах, можно считать вполне представляющими для пластически стабилизирующего материала. Однако такие измерения характеризуют свойства материала только для того напряженного состояния, в условиях которого они были получены. Для оценки реакции материала на пластическое нагружение в условиях напряженного состояния, отличавшегося от рассмотренного, по-прежнему, необходимо бы провести соответствующие испытания. Но такой путь решения проблемы неправилен, так как в местах сужения образца могут возникнуть различные напряженные состояния.

Напомним, что в теории малых упругопластических деформаций приняты допущения, которые позволяют анализировать

поведением упругопластического тела при различных видах напряженного состояния. Эти допущения (гипотезы) высчитываются в следующем Вэ-приближении, допущение, что при пластической деформации не происходит изменения объема, это предположение вполне подтверждено экспериментально. Согласно второй гипотезе связь между упругопластичностью напряжений и упругопластичностью деформаций устанавливается в виде напряженного состояния, что также удовлетворительно подтверждено опытом на разных материалах. Эти гипотезы выполняются также гипотезой единой прямой, в которой получается путем обработки данных растяжения, поскольку такая диаграмма получается в осевом растяжении образца.

Упругопластическое напряжение σ_1 рассчитывается по формуле:

$$\sigma_1 = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} / \sqrt{2}, \quad (2.7)$$

а величина деформаций -

$$\epsilon_1 = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_x - \epsilon_z)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2)} / \sqrt{2}. \quad (2.8)$$

При одностороннем напряженном состоянии

$$\sigma_1 = \sigma_x; \quad \epsilon_1 = \epsilon_x = \epsilon, \quad (2.9)$$

где ϵ - средняя деформация, а угол сжатия гипотезы;

$$\epsilon = \theta^2 / 3\lambda, \quad (2.10)$$

где λ - модуль объемаемой деформации;

$$\lambda = E / 3(1 - 2\nu^2), \quad (2.11)$$

где ν - коэффициент поперечной деформации при упругой деформации материала. Средняя деформация при одностороннем растяжении или сжатии $\sigma = \sigma_x / \sqrt{3}$, и тогда

$$\sigma_1 = \sigma_x = (1 - 2\nu^2) \sigma / \sqrt{3}. \quad (2.12)$$

Пример для первого материала в пластическом состоянии в теории малых упругопластических деформаций - известный материал Мнзс:

$$\sigma_1 = \sigma_x, \quad \text{или } \epsilon_1 = \epsilon_x / 3\lambda = 0,36 \epsilon_x. \quad (2.13)$$

Предполагаем, что при цилиндрическом нагружении такая справедлива гипотеза теории малых упругопластических деформаций, основанная на диаграмме пластического деформирования и обобщенной диаграмме. В качестве критерия передела материала в упругопластическом состоянии применим также критерий Мизеса, однако связываем его с напряжением, считаящимся предельно пропорциональности на диаграмме упругопластического деформирования, пластического предела пропорциональности:

$$\sigma_1 = \sigma_0^1. \quad (2.8)$$

Предполагаем, что и при цилиндрическом нагружении, в процессе которого возникают малые упругопластические деформации, свойства материала (изотропных) неизменяются к началу нагружения, являясь таковыми одной кривой в этой области деформации. Какую кривую определяем как обобщенную диаграмму упругопластического деформирования в параметрах σ_1 и ϵ_1 . Для построения этой кривой можно воспользоваться результатами опыта при цилиндрическом осевом нагружении для при цилиндрическом кручении крутящих образцов.

В первом случае используем зависимость (2.3)-(2.8), а во втором, при кручении, на основании формул (2.1) и (2.2) можно найти, что

$$\sigma_1 = \sqrt{3} \tau; \quad \epsilon_1 = j/j_0 \sqrt{3}. \quad (2.9)$$

Изгибная упругопластическая деформация, получаемая при кручении, преобразуется в диаграмму для осевого нагружения по формулам:

$$\sigma_2 = \sqrt{3} \tau; \quad \epsilon_2 = (j + (1-j^2)\tau/\epsilon) / \sqrt{3}, \quad (2.10)$$

где j' - коэффициент поперечной деформации для упругого деформирования материала.

Состояние полного деформирования справедливо гипотеза одной кривой для цилиндрического нагружения или деформирования осей стержней. Немного иначе обстоит ситуация опыта для осей ИОСНП, которые проводились при цилиндрическом растяжении - сжатии цилиндрических образцов и при пластическом кручении толстостенных труб. Изгибная упругопластическая деформация, получаемая при этом сопоставляется и прикладываем к обобщенным изгибанием $\bar{\tau} = \tau/\tau_0$ и в деформациях деформации единицы $\bar{j} = j/j_0$, практически совпадают.

При осевом нагружении таких образцов встречаются трудности, связанные с возможностью которой устойчивости образца при возникновении пластических деформаций сдвига и кручения. В последнем случае устойчивость другой формы образца обеспечивается наличием ползательной нагрузки на материал с малым коэффициентом трения, контролируемым термометром. В случае осевого изгибания применяется цилиндрический обобщенный короткий образец $(l_0/d_0 = 3)$ или коническая форма образца и приложены ему как вращающим моментом (см. рис. 100).

Специальная форма образца для испытаний при осевом изгибании приводит к незначительному изгибному состоянию образца по длине, предотвращает эффект концентрации напряжений, дает и весьма упругой ($K_2 = 1,05-1,20$) осевую для материалов деформации гибкой, сущность, часть образца преобразует в материал цилиндрической диаметра, что позволяет найти ползательную деформацию.

Получены деформационной теории компоненты тензора деформации изгибной деформации пропорционально компонентам тензора деформации:

$$(\epsilon_x - \epsilon_y)/\theta_y - \theta = (\epsilon_x - \epsilon_y)/(\epsilon_y - \epsilon_x). \quad (2.11)$$

Так как $\theta_y = 0$, то (2.11) и (2.4) следует:

$$\epsilon_y = -0,5 \epsilon_x + \epsilon_x / \theta_K,$$

откуда

$$\epsilon_x = -\epsilon_y / j' = (1 - 2j'^2) \theta_K / 2 - 2\epsilon_y, \quad (2.12)$$

где $\epsilon_y = d_{00}/d_0 - 1$; d_0 - диаметр образца в начале деформации; d_{00} - диаметр в конце деформации.

При многоэтапных пластических деформациях, когда $\epsilon_y = \epsilon_{y0} + \epsilon_y$, следует воспользоваться логарифмическими деформациями для расчета осевой деформации. Логарифмическая деформация вычисляется по формулам:

$$\epsilon_y = \ln(1 + \epsilon_y) = \ln(d_{001}/d_0).$$

Начальное осевое деформации при указанном условии определяется как:

$$\epsilon_{x0} = -2\epsilon_{y0} - 2\ln(d_{001}/d_0),$$

но $\epsilon_x = \ln(1 + \epsilon_x)$ и тогда осевая деформация $\epsilon_x = \epsilon_{x0}/d_{001}^2 - 1$.

Покажем, что логичны основы деформации при разрыве образца в результате одноосевого растяжения

$$\epsilon_{\text{н}} = -2 \ln \frac{d}{d_0} = -2 \ln(1 - \psi)^{\text{н}} = -\ln(1 - \psi), \quad (2.12)$$

где d_0 - номинальный диаметр образца; d - диаметр, измеренный после растяжения в точке; ψ - относительное сужение.

В настоящей работе приведены обобщенные диаграммы циклического деформирования для двух широко распространенных судостроительных сталей повышенной прочности. Эти диаграммы получены в результате обработки данных опытов при циклическом кручении толстостенных трубчатых образцов, изготовленных по рис.18, и приведены в нормальных напряжениях к линейным деформациям по формуле (2.10). В табл.1 даны значения напряжений и деформаций, соответствующие диаграмме для стали 08Г2, а в табл.2 - для стали 10ХНД.

Таблица 1

Обобщенные диаграммы для стали 08Г2

$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа
0,05	105,0	0,45	569,9	0,85	651,4	1,25	686,6
0,10	210,0	0,60	695,0	0,90	696,9	1,30	708,9
0,15	303,9	0,65	693,6	0,95	685,3	1,35	709,3
0,20	369,3	0,60	609,6	1,00	670,7	1,40	714,6
0,25	435,0	0,65	620,3	1,05	677,1	1,45	719,3
0,30	492,1	0,70	629,0	1,10	683,6	1,50	724,3
0,35	519,6	0,75	634,3	1,15	687,8	1,55	728,9
0,40	547,5	0,80	640,9	1,20	693,2	1,60	733,9

Таблица 2

Обобщенные диаграммы для стали 10ХНД

$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа
0,05	105,0	0,35	595,0	0,65	778,9	0,95	876,5
0,10	210,0	0,40	631,0	0,70	799,3	1,00	890,3
0,15	315,0	0,45	668,6	0,75	816,4	1,05	903,2
0,20	419,7	0,50	702,9	0,80	832,5	1,10	915,7
0,25	485,3	0,55	730,7	0,85	848,6	1,15	928,8
0,30	526,7	0,60	756,4	0,90	862,5	1,20	939,7

В дополнение к диаграммам циклического деформирования судостроительных сталей в табл.3 приведены диаграммы для алюминий-магниевого сплава АМг-61. Этот сплав, как следует из данных рис.17, отличается заметным циклическим упрочнением, которое проявляется особым образом при разрыве образца в толстой точке. Однако, поскольку картину поведения сплава при циклическом деформировании можно бы дать совместно обобщенным графиком, каждая из которых отнесена бы определенной величине $\sigma/\bar{\sigma}$, где σ - число циклов нагружения, при котором снята диаграмма, N - число нагружений до разрушения при заданных условиях испытаний. Однако использование таких данных в настоящее время затруднительно, так как нет адекватной расчетной схемы. Для приближенных расчетов сроков сокращения усталости сплава можно использовать, как предлагал С.Насон, обобщенные диаграммы циклического деформирования, соответствующие величине деформации, т.е. $\sigma/\bar{\sigma} = 0,5$. Именно такая диаграмма дана в табл.3.

Таблица 3

Обобщенные диаграммы для сплава АМг-61

$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа	$\Delta \epsilon$, %	$\Delta \sigma$, МПа
0,2	140,0	0,9	388,6	1,4	436,8	2,0	483,6
0,3	211,0	0,9	400,7	1,5	442,0	2,1	467,2
0,4	276,0	1,0	410,0	1,6	446,7	2,2	470,8
0,5	319,5	1,1	418,0	1,7	451,2	2,3	473,9
0,6	369,5	1,2	423,0	1,8	455,2	2,4	476,8
0,7	378,0	1,3	431,3	1,9	459,6	2,5	479,3

Глава 3 ЗАВИСИМОСТЬ УСТАЛОСТИ НА СТАЛИ ПОДОГОТОВКИ ТРЕЩИНЫ

3.1. Критерии усталости при циклическом нагружении

Согласно наблюдениям, усталостное разрушение деталей машин, конструкций и образцов при циклических процессах в две стадии.

На первой стадии в определенных, но всегда предугадываемых местах, возникает и увеличивается усталостное повреждение, в конце стадии обнаруживаются следы появления трещины усталости. Вторая стадия соответствует распространению трещины до полного details, образца или до выхода на острый изогнутый элемент. Механизмы явления на этих стадиях (на микроэкономическом уровне) одни и те же, однако их микромеханическое проявление, а также автоматические модели, феноменологические критерии различны.

Рассмотрим сначала феноменологические особенности усталости на стадии подготовки трещины в возможности циклического процесса выходы трещины в конструкции под действием переменных нагрузок.

Основу современных эмпирических представлений об усталости металла составляют данные Вилера. В 1870 г. им были опубликованы результаты более чем десятилетних исследований усталости металлов осей при циклическом нагружении. Основные данные работы заключаются примерно в следующем:

- для одного и того же материала (и одного и того же вида образцов, изготовленных из этого материала) существует определенная амплитуда, характеризующая максимальные напряжения, развивающиеся в образце при циклическом нагружении, и такая переменная нагрузка до разрушения;
- существует некоторый критический уровень напряжений, ниже которого при повторном нагружении разрушение происходит, и при напряжениях ниже этого уровня разрушений не бывает независимо от числа повторных нагрузок. Этот критический уровень, называемый пределом усталости, проявляется при большом числе циклов нагружения, примерно при 3-5 млн. На рис. 19 показана схема циклического нагружения и характерное поведение нагрузки, при которой возникает соответствующее напряжение. При отсутствии постоянной составляющей нагрузки ($R_p = 0$) или

напряжения симметричны, при этом $R_{max} = R_{min} = R_0$, R_0 - амплитудное значение нагрузки. Если $R_p \neq 0$, цикл нагружения называется асимметричным. В этом случае в качестве характеристики асимметричного нагружения используется понятие коэффициента асимметрии цикла: $R_{min}/R_{max} = r$.

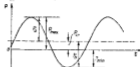


Рис. 19. Схема циклического нагружения

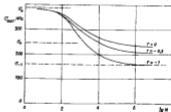


Рис. 20. Кривые усталости для стали образцы на малоугловатой стали

На рис. 20 изображены относительно кривые усталости или кривые Вилера (как их тогда называли) отрывочные отрывочные феноменологические разрушения материала при переменном нагружении. Поскольку числа циклов нагружения до разрушения образцы или детали конструкции N рассматриваются в зависимости от характерного напряжения в очень широком диапазоне - от

1/4 цикла (простое растяжение) до нескольких десятков миллионных цикла - для образцов прямой ориентации пологорифмические координаты. По оси ординат откладываются координаты для цикла, как на рис.20, максимальные значения - максимальных напряжений, а по оси абсцисс - десятичные логарифмы числа цикла N .

На прямой усталости при $r = -1$ указаны пределы усталости S_{-1} , определяемой при симметричном цикле нагружения, его значение указывается на условной шкале. Однако обычно под пределом усталости понимают именно величину, найденную при симметричном нагружении. Необходимо подчеркнуть, что предел усталости материала должен определяться по данным испытаний образцов, в рабочей части которых обеспечивается однородное напряженное состояние (см. рис.18), при одностороннем растяжении-сжатии или циклическом кручении.

Исследованиями опыта показывают, что предел усталости конструктивных сталей, в том числе в области, применительно к ориентации, составляет примерно 0,43-0,50 от временного сопротивления, но не зависит от предела текучести. Только у "арми-алюмин", практически чистого металла, предел усталости явно отличается от предела текучести; у конструктивных сталей он обычно выше временного и в крайних случаях этих пределов довольно близки. Анализом данных статистического деформирования сталей, Вушаргер установил, что напряжение, соответствующее средней части диаграммы, примерно в два раза больше предела усталости. Сопоставив на этом, Вушаргер назвал предел усталости естественным пределом пропорциональности, который обнаруживается только в результате испытаний при переменном нагружении.

Становит, что далеко не все конструктивные материалы имеют предел усталости. Под алюминиями имеются, однако следует, ведь не имеет определенного предела усталости, и их сопротивление снижается до нуля увеличением числа цикла нагружения (рис.21). Кроме того, у конструктивных сталей с низким пределом усталости по данным испытаний на воздухе при циклическом нагружении в условиях воздействия агрессивной среды с увеличением числа цикла нагружения, времени испытаний и увеличенной степени сопротивления переменным нагрузкам. В этом случае, правда, отсутствует предел усталости именно не имеющиеся кристаллической решетки, а наличием коррозийного

вещества и коррозийного расширения.

Важной особенностью результатов усталостных испытаний является исключительный разброс данных опыта, особенно, при одном и том же значении амплитуды напряжения. Можно предугадать самые разные предположения и теории возникновения и развития трещины в процессе испытаний (что происходит в действительности), в установившемся нагружении при постоянных, т.е. в "нормальных" (дальних, значительных) циклах могла бы вызвать разброс результатов, и тем не менее, который заметен при одном и том же значении амплитуды напряжения, который обусловлен разнородностью материала, членами цикла до разрушения образца.

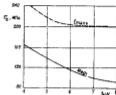


Рис.21. Прямые усталости сталей в воде

Рассеяние результатов определяется также (дальними):

- статистической природой явления усталости, связанной со структурной неоднородностью материала и, как следствие, неоднородностью циклического деформирования;
- рассеянием механических свойств металла в процессе отливки и литья;
- различием технологических (дальних, сопутствующих) процессов изготовления образца, конструкции и т.д.

Разброс результатов усталостных испытаний приходится учитывать для статистической обработки данных, а для его полного устранения используются методы математической статистики. При этом вместо прямой усталости следует реконструировать область (рис.22), в которой реконструируется результаты опыта, и вместо опыта в этой области определяются вероятностной мерой, например, обеспеченностью данным трещины, разрушения образца или конструкции при заданном номинальном напряжении. Порядок расчета статистических характеристик усталости изложен в справочнике [10]. Отметим, что рассечение результатов опыта увеличивается со снижением амплитуды

напряжения и по мере приближения ее к предельной упругости может достигать одного десятичного периода и более по логарифмичности. При циклическом деформировании в области заметных пластических деформаций разброс значительно меньше, чем при циклическом нагружении; при $N \leq 10^3$ он практически может не учитываться, однако с приближением к предельной упругости $\sigma = E_p/\epsilon$ разброс становится существенным.

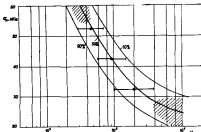


Рис. 2.2. Разброс результатов испытаний выносливости

Подчеркнем, что кроме упругости для материалов как характеристики сопротивления данному материалу равномерному нагружению можно получить только при условии, что в рабочей части образца имеется однородное напряженное состояние простого вида. Во второй главе мы уже видели также варианты: осевое нагружение по симметричному или цилиндрическому образцу или образцу Коффина, по форме уменьшающегося поперечного сечения, или циклическое кручение толстостенной трубы также по симметричному типу (см. рис. 1.8).

Для известного цикла можно использовать также виды нагружений, как циклический изгиб массивных образцов, следовательно простейшее осуществление. Однако надо помнить, что напряженное состояние образца в таких случаях неоднородно по длине и толщине, что существенно уменьшает значение ре-

зультатов в смысле предела или общей характеристики, уменьшает значение толщ факторов, или фактор выносливости.

3.2. Особенности деформирования материалов в конструкции

Усталость материала в конструкции оценивается весьма сложным комплексом. Чтобы описать это, достаточно представить, чем отличается конструкция, например, уже рассмотренный балки набора в разных частях и условия ее нагружения от простого лабораторного образца и условий его испытания. Предлагаемые правила конструкции в этом смысле: особенности формы и напряженного состояния, наличие соединений с сопрягаемыми или несопрягаемыми пластическими материалами и соответствующим напряжением, качество поверхности, особенности нагружения частей конструкции, наличие из которых является случайный характер внутренних дефектов, наличие окружающей среды, включая коррозию материалов и т. д. Простое перечисление особенностей конструкции и ее нагружения по сравнению с образцом и способом его испытания позволяет, насколько сложной оказывается задача измерения, которую труднее определить достаточно малую конструкцию, особенно сложную сформированной или в соответствии с заданными критериями, например, усталости.

Сложность проблемы усталости конструкций является несомненно разобранной упомянуто моделью сложной, которая строится на основе представления об усталости материала при циклическом симметричном нагружении (деформировании). Предлагаемые особенности конструкции разбиваются на отдельные факторы, рассматриваются влияние этих факторов на симметричную ось, на сопротивление материалам. Это влияние оценивается различными параметрами нагружения, позволяющими затем сделать оценку модели, характерную сопротивление реальному нагружению, позволяющую рассчитать предельную выносливость конструкции до появления усталостного повреждения. Достоверность такой оценки зависит от того, насколько качественно и количественно правильно описаны в ней все существенные стороны явления.

В дальнейшем мы будем придерживаться такого подхода к анализу усталости конструкции сущности корпуса и в формиро-

выше указанной условности как на стадии зарождения трещины, так и на стадии ее распространения.

Разсмотрим особенности конструкции и их влияние на сопротивление материалу переменному нагружению. Введем понятие для ряда испытаний, при которых исследуют свойства материалов при переменном нагружении и изменчивости условного сопротивления. Это циклическое нагружение, когда задается амплитуда номинального напряжения, а циклическое деформирование. Наименьшая амплитуда из них является условием, в котором находится материал в конструкции во время ее эксплуатации.

Считаем, что трещины условности возникают почти исключительно в тех частях конструкции, где имеются максимальные напряжения. Они возникают в тех местах, где происходят резкие сдвиги, т.е. на границе впадины и обода у шара, в местах конструкции рядом с изгибными соединениями, у шаров и стенок рамы сфер для прохода балки шара и т.д. Возможность появления трещин в таких местах увеличивается наличием старших соединений, наличием дисперсионной неоднородности и металлургической неоднородности в конструкции, а в процессе формирования соединения создается напряжение для конструкции напряжения, которые непосредственно в зоне соединения или его окрестности могут достигать предела текучести.

Считаем, что для зарождения в районах условности поразительной скорости, чтобы достичь напряжения в конструкции во время ее эксплуатации необходимо сдвинуться δ_0 или предельная условность материала для данного участка конструкции. Правда, как будет видно из дальнейшего, такая формировка возможности осуществления условной условности происходит не в одной точке. Не является она в точке детали наличием неоднородностей условности поразительной конструкции, образуя влияние на величину возможности деформации материал в зоне концентрации напряжений.

Пусть конструкция, представляющая интерес для обсуждения - участок верхней полуды шара с шаром для турбины или для части шасси, вращающаяся. Допустим, что полуды подвергается циклическому растяжению-сжатию вдоль диаметральной плоскости, происходящему при движении шара вперед или назад относительно регулярной волны, пре-

чем в этом направлении деформирован шар. Общее состояние деформирования, и то - при определенных нагружениях - может быть дано с помощью графиков обода при расчете пластичности полуды любого речевого шара для условно приложенной или расчетной предельной скорости при оценке предела прочности [20]. Предполагаем, что концентрации напряжений у шаров оказались настолько высокими, что в полученных напряжениях впадин у шаров впадина полуды у шаров испытывает пластическое деформирование. На рис.23 изображены напряжения σ_x (горизонтальная ось соответствует продольной оси шара) в полуде в окрестности шаров.

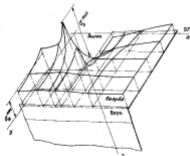


Рис.23. Распределение напряжений σ_x в полуде шара обода шара

Область обода шаров (повышенных напряжений) была по отношению к шару полуды, а зона пластического деформирования области соединения напряжений. Поэтому можно утверждать, что появление пластического деформирования у шаров не ограничено пластичностью на участке регулярного деформирования конструкции. Следовательно, смещение частей конструкции у пластического обода

будет управляться малом упруго деформированной зоной конструкции. На этого расчёта можно сделать вывод о том, что нагрузки малой области, в которой реализуются пластические деформации, будут отвечать симметричному деформированию.

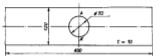


Рис. 24. Образец, используемый модель конструкции с концентратором

Этот вывод подтверждается экспериментально. Как показано, например, на рис. 25, образец с круглым отверстием (рис. 24) нагружался осевым усилием по симметричному закону так, что средняя (номинальная) нагрузка в осевом сечении с отверстием была ниже предела текучести, а на краях отверстия в точках А и В возникала пластическая деформация, которая имела вид конической деформации тензорезисторов. Результаты измерений, полученные обработкой данных на автоматическом осциллографе на протяжении всего процесса до появления трещины усталости под тензорезисторами, показаны на рис. 26. Как видно, в начале деформации можно отметить непропорциональное увеличение деформаций вследствие перераспределения напряжений у пластической зоны в направлении осевой нагрузки. Затем деформации стабилизируются и остаются постоянными до возникновения трещины. Таким же образом были получены при измерениях деформаций нагрузки и поперечных конструкций в той области, где возникает концентратор напряжения и обнаруживалась трещина усталости.

Этот факт весьма важен, так как позволяет разработать, как видно будет из дальнейшего, универсальный метод анализа и расчета усталостной долговечности конструкций на стадии подготовки трещины усталости.

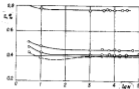


Рис. 25. Распределение деформаций в зоне концентрации напряжений

3.3. Критерий малой трещины усталости

Программа пластического деформирования в отличие от упругой растяжки не содержит непосредственно информации о разрушениях материала, связанном с появлением трещины. При нагружении материала оно происходит после некоторого числа нагрузок или после определенного промежутка времени, если нагрузки не пороговые. Следовательно, функциональные критерии разрушения материала (физический критерий — появление трещины в конструкции) должны быть связаны с количеством, связанного количества нагрузок или время до разрушения с одним из параметров поля пластического течения — $\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}$ или $\bar{\epsilon}_p$:

- а) $N = f_1(\bar{\sigma})$;
- б) $N = f_2(\bar{\epsilon})$ или $N = f_3(\bar{\epsilon}_p)$;
- в) $N = f_4(\bar{\epsilon}_p)$.

Критерий (а) является самым; критерий Вилера представляет собой конкретную математическую деформацию; имеется несколько вариантов ее аппроксимации, например, зависимость вида:

$$N = N_0 (\bar{\sigma} / \bar{\sigma}_0)^{-m}, \quad (3.1)$$

где m , $\bar{\sigma}_0$ и N_0 — эмпирические константы, представляет пример конкретной малой осевой критерий. Применения этого критерия ограничено упруго деформированным материалом; кроме

того, напряжение может служить только косвенной характеристикой усталостного повреждения. Несмотря на это, в инженерных расчетах (3.1) применяется довольно часто.

Одним из первых исследователей, обративших внимание на особенности деформации материала в конструкции, был, по-видимому, Коффин. Он провел эксперимент различных конструктивных материалов при циклическом деформировании в его области разных упроченных амплитуд деформации незначительной. Для этих целей использовались образцы в форме палочек часов (см. рис. 10), а деформация осуществлялась изменением диаметра образца в его узкой части, как показано в гл. 2. На рис. 26 изображены типичная кривая усталости для углеродистой стали 10СВ 34Х, полученная Коффинем. Результаты опытов оказались специфическими, особенно в сравнении с теми, которые получали при циклическом нагружении. Во-первых, опытные точки, соответствующие разрушению образцов, в координатах $\log \Delta \epsilon_p$ - $\log N$, где $\Delta \epsilon_p$ - ширина петли пластического гистерезиса, расположились на одной прямой - для каждого материала, а для разных материалов - темного цвета, оставаясь параллельными.

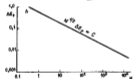


рис. 26. "Пластическая" кривая усталости: а - разрушение при статическом растяжении

лей, сплавов алюминия - также прямые оказались довольно близкими. Во-вторых, опытные точки весьма незначительно отклонялись от прямой линии при малых амплитудах, в области заметных пластических деформаций результаты испытаний оказались неудовлетворительными. Наконец третьим важным результатом исследования было то, близким $\log 0.5$, что позволило Коффину написать уравнение для кривой усталости при циклическом деформировании в виде:

$$N^{0.75} \Delta \epsilon_p = C, \quad (3.2)$$

где C - эмпирическая константа. По данным Коффина эта константа оказалась равной логарифму остаточной деформации при разрыве, т.е. при 1/4 цикла, так что

$$N^{0.75} \Delta \epsilon_r = -0.5 \ln(1 - \psi), \quad (3.3)$$

где ψ - относительное сужение.

Такой образом, получалось, что разрушение при монотонном растяжении и при циклическом деформировании подчиняется одной закономерности. Правда, в дальнейшем было установлено, что такое утверждение не вполне точно, и что выходящий за пределы отклонения при N в формуле (3.3) для каждого материала индивидуальной, эмпирической константой от 0.5.

В конструкции вертела судна даже при значительной концентрации напряжений пластические деформации возникают при относительно редких перегибах, поэтому для данного материала в условиях конструкции нужен критерий, который содержал бы в себе диаметры вертела (3.3) и дал бы возможность учесть усталостное повреждение при малых перегибах, которые не сопровождаются заметными пластическими деформациями.

Согласно опытам данных см. рис. 25 суммарная пластическая деформация в поле концентрации напряжений не увеличивается ни при изменении амплитуды (если, разумеется, не выйдет область нагружения конструкции или образца с концентратором), поэтому целесообразно было получить критерий, основанный суммарной деформации. Такой критерий предложил Коффин и Талерманн в 1932 г. в виде:

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_p + \Delta \epsilon_e = CN^{-0.75} + 2\sigma_{-1}/E. \quad (3.4)$$

Как видно, в формуле (3.4) учитывалась деформация отрывающей природы усталости при симметричном цикле для данного материала и в условиях однородного напряженного состояния, действовавшего в течение заданной заданной амплитуды, что, конечно, это пластическое напряжение, а не напряжение (предела текучести) собои разрыв, упроченная амплитуда. Формула (3.4) была принята для расчета усталости в инженерных расчетах и получила название эмпирической "концентрационной" формулы. Однако при нагружении даже если нет возможности провести опыт, для исследования свойств материала константа C рассчитывается по статической величине относительного сужения, предел текучести или симметричному циклу тоже определяется как стандарт-

ная характеристика данного материала, так что для определения долговечности конструкции можно получить заданную деформацию в зоне сжимаемого разрушения и по формуле (3.4) найти число циклов (заданная равнина образца):

$$N = (CE/E_0)^{1/k} (E_0/E_1 - \varepsilon)^{1/k} \quad (3.5)$$

Чему же соответствует это число циклов? Если бы речь шла об образце, то значением N означало бы его разрушение, в границах, разрушения однородно деформированного объема материала. По-видимому, это число циклов, как показывается из рисунка, должно определять момент разрушения пластической деформированного объема для наиболее высокой концентрации деформации. В разрушенной конструкции, разумеется, не может быть речь, так как этому предшествует более или менее продолжительный период распространения трещины усталости по конструкции, который рассматривается подробно в дальнейших разделах пособия.

Критерий (3.4) не совсем точен, так как усталая деформация присутствует в нем не полностью, а только частая, соответствующая пределу усталости. Как следует из слов рис.9, усталая часть растет при увеличении максимального напряжения, соответствующего крайней точке диаграммы циклического деформирования. Это напряжение зависит от усталой пластичности, свойств материала и обычно превышает усталый предел усталости. Кроме того, степень долговечности при разных пластических деформациях следует понимать как среднюю в связи с изменением размеров остатков данных в этой области.

В 1962 г. выработ критерий, в котором усталая часть не постоянна, предположил Мессен:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_u = C N^{-a} + B N^{-b} \quad (3.6)$$

Константы в этой формуле определяются для разных материалов эмпирическим. Формула Мессона более точна, чем (3.4), пластическая составляющая материала эмпирически деформируемая, особенно в диапазоне долговечностей по осям $N^a - 10^6$, но она не охватывает свойства материалов, имеющих предел усталости. Поэтому критерий (3.6) пригоден для оценки усталости металла, но не для предел усталости, как для оценки

разрушения при переменных нагрузках в коррозионной среде.

Для металла с пределом усталости наиболее точная в физическом отношении форма закона критерия предложена Кайшоном и Коэн:

$$\Delta \varepsilon = C N^{-a} + B N^{-b} + 2 \varepsilon_u / N$$

Однако эта зависимость неудобна для расчетов и поэтому чаще всего применяется критерий (3.4). Существуют и другие варианты закона эмпирического критерия, которые можно найти в литературе. Значения констант в деформационных критериях, определенные по данным испытаний, приведены в табл.4.

Таблица 4

Параметры деформационных критериев

Марка материала	C	B	a	b	σ_u , МПа	σ_p , МПа	Φ , %
ВМСт-Зсп	0,630	0,015	0,654	0,170	340	390	50
08Г2	0,340	0,011	0,653	0,142	300	450	50
ГОКНД	0,400	0,013	0,653	0,140	400	594	50
ГОКНД ¹⁾	0,155	-	0,653	-	-	-	-
ВМСт-3В	0,480	0,011	0,622	0,127	360	530	-
МСт-6Г	0,050	0,007	0,400	0,100	180	417	12
В-35	0,215	-	0,500	-	335	393	38

¹⁾ По данным испытаний образцов, выработанных на этапе первоначальной пластичности пробита.

В табл.4 приведен данные для стали ГОКНД, характеризующие данные тестовые, способности пластичности материала, которое выработано в состоянии пластичности образца при нагружении в направлении, перпендикулярном плоскости провала. Как видно, это значение соответствует на величине константы C, которая при испытаниях на кручение цилиндрических трубой оказалась равной 0,155, а то время как испытание при осевом нагружении дало C = 0,400. Такое различие в значениях константы соответствует различие в долговечности материала в 4,3 раза и оно может быть еще более значительным у материала с более высокой пластичностью. Так, если при испытаниях $\Phi_p = 0,75$ (вдоль провала), а в перпендикулярном направлении $\Phi_p = 0,1$, то "долговечность" составит всего 0,07 от долговечности при нагружении вдоль x . Это весьма важно для практических приложений.

3.4. Наблюдения процесса усталостного разрушения

После того, как рассмотрены качественные соотношения, характеризующие разрушение при переменном нагружении, в критерии разрушения, целесообразно обратиться к динамическим особенностям явления.

Первые попытки выявления причин усталостного повреждения металла, связав его с микроструктурными изменениями при нагрузке Негу и Хендри (1921 г.). Наблюдали появление отслаивающегося и протяженного участка образца в соседней микроскопе в процессе нагружения, они обнаружили появление в зернах металла вскоре после начала испытания систем тонких параллельных линий, линий сдвига, известных по микротомным исследованиям деформированного материала. Однако если при простом растяжении линии сдвига возникают практически во всех зернах металла и металле по мере деформирования образцов, при циклическом нагружении линии наблюдались не во всех зернах, но их число возрастало с увеличением числа циклов. Обнаружены также скопления в крупных зернах типа «одежда изобретателя», а в этих участках и дальнейшем происходила трещина усталости.

Последующие работы исследователя позволили детализировать картину развития процесса усталостного повреждения, дать убедительное объяснение явления.

Согласно данным В.С.Мазуров, Н.К.Шенгал, Т.Вуда и других исследователей, на протяжении определенного периода от начала циклического нагружения с умеренными параметрами, на среднем этапе ИВ от общей протяженности сдвига, структура металла в зернах имеет характер почти постоянной. Этот период соответствует появлению зернами сферичного зародышка и развитию повреждения, микротрещинного периода. В конце периода повреждения в результате циклического нагружения происходит наблюдаемое в этом периоде увеличение скорости материала как следствие увеличения плотности дислокаций. Сами показывают, что линии микротрещинного периода в установившемся повреждении имеют быть усталой соответствующей термической, следовательно, на первых порах повреждения обратимо.

Первый период начинается с момента появления тонких сдвига, первых малых скоплениях внутри отдельных зерен, обусловленных концентрацией выходов дислокаций в определен-

ных кристаллографических плоскостей. Термическая обработка в этом периоде уже не ликвидирует все сдвиги сдвига, хотя в начальные стадии они могут изменять их конфигурацию. По мере увеличения числа циклов от начала испытания происходит рост числа зерен, развивающихся в параллельных плоскостях скопления в пределах зерна, субзерна. Характерно, что с каждым циклом количество зерен сдвига, в особенности на границах блоков и зерен, при возрастании плотности повреждений со стороны соседних зерен структуры, заметно увеличивается субструктура зерна. Эти процессы усиливаются на микротрещинных субструктурах.

Первый период развития трещины развивается при высокой и умеренной нагруженности. Только сдвиги первоначально развиваются в пределах блока при нагружении, типичные повреждения трещин усталости. С ростом напряжений сдвиги сдвига становятся короче, они концентрируются у границ зерен и субзерна. Это означает, что микротрещинные барьеры для дислокаций оказываются относительно менее эффективными и дислокационные процессы концентрируются у границ зерен. В дальнейшем явление в этих областях сопровождается трещинами усталости. Скопление напряжений на границе усталости не ведет к немедленному накоплению критической пластической деформации: тонкие сдвиги сдвига обнаруживаются при действии весьма умеренных напряжений, составляющих примерно половину предела усталости. Этот факт объясняет повреждение металла напряжением ниже предела усталости, наблюдаемое при нагрузке металла в условиях реального случайного нагружения.

Продолжающееся циклическое нагружение на протяжении второго этапа приводит в процессе интенсификации сдвига к образованию зернистой трещины усталости в зернах с наиболее высокой концентрацией сдвига - субмикротрещины. Первоначально субмикротрещины появляются и развиваются внутри одного зерна; момент выхода этих трещин за пределы соседней структурной ячейки, подготовленной микротрещинной трещиной соседнего зерна, как правило сдвига, отвечает началу третьего периода усталости.

С развитием зернистой субмикротрещины соседних зерен начинается. Когда такой процесс распространяется на два-три зерна, образуется микротрещина. В металловедении этот процесс считается соответствующим началу трещины усталости.

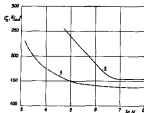


Рис. 27. Нахождение угла загиба при загибании:
1 — образование полукруглой формы загиба; 2 — образование микротрещин

Рост микротрещин сопровождается концентрированием напряжений не по пути, причем в определенном месте начинают развиваться крупные концентрированные у вершины трещины. Например в осевом сечении трещины, первоначально распространяясь вдоль всего объема сплавления, может трансформироваться и распространяться преимущественно по направлению наибольшего главного напряжения. В дальнейшем микротрещины (рис. 28) преобразуются в микрогребни и в определенных условиях возможно ее разуплотнение с образованием шейки.

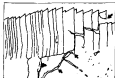


Рис. 28. Процесс формирования микрогребней на поверхности металла

Количество остаточного перенапряжения, который может возникнуть разрушением объекта или изделия из сплава, иногда составляет до 50% и более общей продольности объекта или конструкции сооружения.

Разное состояние напряжений остаточного напряжения металла может определяться внутренним и внешним критериями, которые можно определять по значению остатков напряжения трещины остаточности и начало остатков ее распространения. По наличию экспериментальных данных, относящихся к результатам количественной оценки образцов, в качестве физического критерия остаточности можно принять разрушение образца, однако остается значительной частью процесса является оценка остаточности такого критерия. Таким же не было исключение внутреннее состояние образца, пока, что с увеличением времени усталости деформированный материал существенно увеличивается и поэтому определять результаты деформирования материала пока трещины нет в деформированном материале у вершины трещины. Несмотря на трудности остаточности трещины, эти две оценки являются в действительности основными.

При остаточных образцах в условиях остаточного деформирования, с которых или речь идет, по критериям остаточности материал характеризуется высокой прочностью, при которой уменьшается размер усталостных остаточных образцов (уменьшение остаточного усталости или критического момента, которое относится по количеству распространения трещины). Следовательно, должна быть практическая уверенность в том, что остаточные остаточные образцы являются положительными трещинами, а не являются следствием процесса разрушения.

При остаточных образцах конструкций или натурных конструкций в лабораторных условиях обнаружение трещины может быть инструментально обеспечена оценка. Обычно, т.е. с использованием микрошлифов, с помощью проволочных проволочек или методов внутренних точек удается обнаружить трещины протяженности 0,2-2,0 мм в зависимости от остаточной поверхности; у вершины образца или с помощью микрошлифовых дефектных обнаружение трещины связано с остаточным затуханием. В конструкциях судного корпуса часто обнаруживаются трещины вблизи значительной протяженности, так как их наличие определяется остаточными поверхностями, сварочными швами, продуктами коррозии. Кроме того, трещины трудно заметить, когда обнаружены на наружной и трещины не распространены; значительная часть конструкций корпуса исследована.

Научные знания пропавшей усталости и механические особенности процесса породило множество теорий усталости, которые основаны на результатах исследований отдельных сторон явления и должны были объяснить их; полной теория усталости пока нет.

В теории упрочнения Гафа и Лисова (1923 г.) усталостное разрушение представляло как следствие упрочнения металла в результате роста внутренних напряжений при пластическом деформировании. Эта теория получила наибольшее прикладное значение ряда металлов в процессе упрочнения их прокаткой горячей и в начале второй стадии. Демингер (1940 г.) дополнил теорию Гафа тем, что была предложена о неоднородности пластического деформирования, объясняющей неоднородные свойства кристаллической структуры в связи с различной ориентацией зерен.

Упрочнение и неоднородное деформирование металла при циклическом нагружении возможно в основу теории Фришма, в соответствии с которой усталостные повреждения развиваются в малых пластических областях, возникающих в углублениях, царапинах, трещинах, частях материала с более высокой пределом текучести. Накопившиеся пластические деформации в этих областях приводят к росту внутренних напряжений до предела прочности, в результате чего происходит первичное разрушение.

Пластические свойства разупрочнившихся металлов, связанные сопротивлением микроразрушению связей при высокой напряженности, а также довольно сложный характер поведения металлов при циклическом нагружении описаны теорией Н.А.Одичка, согласно которой циклическое нагружение сопровождается в металле два одномерные протекания и конкурентный процесс — упрочнения и разупрочнения. Упрочнение, как и в предыдущих теориях, считается следствием пластического деформирования, а разупрочнение связывается с перераспределением внутренних напряжений между зернами. Если внутренние напряжения предел усталости, разупрочнение в процессе связывается конкурентной и приводит к разрушению (см. рис.17). В окрестности предела усталости упрочнение связывается по Н.А.Одичку более выраженное и при снижении напряжений продолжает процесс разупрочнения; разрушение при этом не происходит.

Существует ряд альтернативных теорий, среди которых можно выделить теория А.Фредендала и В.С.Миллера. В теории Фредендала была открыта известной (или напряженно-образная при пластическом усталостном деформации. Рассеяние энергии и изменение ее напряжений при циклическом нагружении, как следствие неоднородности, следует учитывать при формулировке совершенной теории усталости, но объяснить и, определить такие образы трещины в металле. Теория В.С.Миллера построена на основе теории, выделенной для разупрочнения металлов в кристаллической структуре циклической структуры при усталости, в которой, характеризующейся незначительное разрушение. Теория Фредендала описывает, усталость, усталость энергии разрушения связывает не по всей области металла, а в основном сосредоточено в разупрочненной зоне.

Экспериментальные данные показывают, что металл другой работы. В основе теории Фредендала, что металл разрушается в результате материала металла от цикла разрушения металла, поэтому в процессе роста трещины, которую материал выдерживает до разрушения, проявляется пластическая деформация металла, построенной в условиях напряжений и деформации. В другой работе предполагается, что металл пластического деформирования материала при циклическом нагружении металла. Современные методы исследования не дают, однако, оснований для подтверждения справедливости такой гипотезы.

Вместе с тем статистическая теория, основанная на предположении о различии свойств отдельных зерен металла. Это различие объясняется сложным распределением характеристик прочности и разупрочнения металла параметров этих зерен при циклическом нагружении. Известны теория Н.А.Федендалова, В.В.Колотина, А.Фредендала и других авторов. Статистическая теория позволяет учесть статистическую природу усталостного повреждения и получить подробное представление явления.

Сложными условиями явления, происходящих в металле при циклическом нагружении, природа усталости наиболее полно раскрыты в теории Фредендала. Предложена в 1931 г. Фредендалом и Феллером объяснение низкой прочности металла металлов или разрушения присутствует в кристаллах металлов металлов — деформации объясняется весьма продуктивной, в особенности, когда в 50-60-е годы была обнаружена наличие явления

ной системы путем и установлена их роль в пластическом деформировании металлов при растяжении. Наблюдения показали, что пластическая деформация есть результат выхода на границы дислокации и разрыва дислокаций, причем в процессе деформирования происходит также и формирование новых дислокаций.

При критическом нагружении от его начала происходит увеличение плотности дислокаций (сравнительно легкой деформации структуры, связанной с началом течения). Этот процесс на протяжении микроскопического периода имеет ту особенность, что дислокации дислокаций и их выходы на поверхность концентрируются в отдельных плоскостях скопления, совпадающих с определенными кристаллографическими плоскостями в зернах. Увеличение плотности дислокаций обусловлено действием внутренних источников - полупараллельных дислокаций, источников Франка-Риза.

При умеренных напряжениях границы близко, зерно взаимодействием атомов придают структуру дислокации, что является перестройкой, перестройкой характер скопления, пластического деформирования. Увеличение плотности дислокаций создает внутренние узлы, является увеличением сопротивления скопления. Микростатическое это проявляется в повышении микротвердости, в критическом упрочнении. В конце периода быстрого развития напряжения упрочнение прекращается, следы спонтанного скопления дислокаций на поверхности в виде тонких полос одного направления заметны в общей микроструктуре (рис. 29, а). Следы образования выходов полос скопления показаны на рис. 29, б, где показано также состояние поверхности металла, наблюдаемое в микроскопе на поперечном срезе.

На протяжении второго периода развития упругоэластического поперечного в отдельных плоскостях скопления дислокаций достигают критического уровня (порядка 10^{10} см⁻²), и в этих плоскостях происходит перемещение дислокаций, образование трещин. Преобладающая начальная субструктура состоит из тонких линий полос скопления в пределах одного зерна в связи с перестройками деформированного участка структуры металлов напряженной среды. С развитием субструктуры, развитием структуры начинается процесс релаксации.

При высокой напряженной внутренней структуре для дислокаций в пределах зерна становится неэффективным, дислокации движутся в пределах этого зерна, скопляются у его границ, и при достижении критической плотности дислокаций также сое-

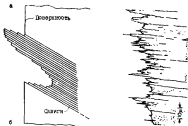
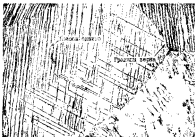


Рис. 29. Снимки на поверхности зерен металла (а) следы формирования полос скопления (б) в процессе деформации (по Бороздину [19]).

кается условием для возникновения субмикротрещин.

Так обосновалось по данным подкаменной природы усталостного разрушения. Главным в этом — усталостное повреждение — есть явление напряжения деформации, происходящего вследствие присутствия в металле и образования в процессе нагружения дислокаций. Из малютого момента в смысле, для любого из внешнего состояния момент допущения критической плотности дислокаций полностью определяет дальнейшее разрушение независимо от механических условий нагружения. Следовательно, алгоритмичности метода вытекают от его способности пластичности деформироваться, пластичного ресурса. Свойств усталостного повреждения вытекают от того, насколько характерна высокая пластичность материала. Так часто используемой термином "мера усталостного повреждения" приобретает иной функциональный смысл.

3.6. Закономерности усталости металлов при случайном нагружении

Важно рассматривалось усталости при циклическом нагружении — простейшей модели случайного нагружения, которому подвергается практически все сооружение. Первые шаги в исследовании усталости при случайном нагружении были сделаны, по-видимому, Палмгеном (1934 г.), изучившим работоспособность шариковых подшипников при переменных режимах нагружения. Для оценки срока службы подшипников Пальмгрен предложил суммировать повреждения, которые накапливаются на разных режимах нагружения. Повреждения, накопленные на i -м режиме, определялись отношением

$$d_i = n_i / N_i,$$

где n_i — число циклов (оборотов) нагружения на i -м режиме;

N_i — число циклов на этом режиме до разрушения подшипника.

Тогда суммарное повреждение

$$D = \sum_i d_i = \sum_i n_i / N_i,$$

в условии разрушения

$$D = \sum_i n_i / N_i = 1. \quad (3.7)$$

Этот результат можно понимать гипотезой линейного суммирования усталостных повреждений, суммированной гипотезой,

которой в дальнейшем была воспользовался Майерсен для оценки усталостной долговечности конструкций и Э.А.Вакарчиан в том же 1940г. Предложена использовалась суммирующая гипотеза для оценки долговечности конструкций мало нагруженных конструктивных элементов. По-прежнему, выдвигалась возможность суммировать опыт использования конструкций в прочностном или долговечности, что было необходимо для наиболее высоко нагруженных и ответственных конструкций, в первую очередь, конструкций самолетов; по-прежнему, критерия гипотезы позволяла применять ее для инженерных расчетов.

Вместе с тем, попытка суммировать с помощью независимости (3.7) результаты опыта с переменными режимами нагружения вылилась ввиду малочисленности особенностей режима нагружения, в основном выключившемся в следующие:

- если опыт начинался при циклическом нагружении с амплитудой напряжения σ_1 , а закончился при напряжении $\sigma_2 > \sigma_1$, то означалось, что вылились меры повреждения D , вычисляемые по формуле (3.7), даже самым статистическим образом, материал проявил более высокую пластичность, чем предполагалась гипотезой; этот эффект назвали переходом;
- если опыт начинался при σ_1 и продолжался до разрушения при $\sigma_2 < \sigma_1$, то мера повреждения означивалась, как правило, меньше единицы.

Выдвигалось также, что в количественном отношении оба эти эффекта сложным образом зависят от соотношения амплитуд напряжений в предельных режимах испытаний, а в связи с двумя уровнями нагружения можно получить систему D примерно в пределах двух десятичных порядков. Если же уровни нагружения в процессе испытаний непрерывно чередовались, то вытекало мера повреждения, вычисляемая по (3.7), существенно обобщилась и группировалась около единицы. Изменяние закономерности стали называть эффектом "линии" материала в условиях нагружения.

Одним из первых признаков этой "линии" стал использовать С.Минсон, который провел опыты на образцах из рудничного аддитивного сплава ЗСН4-74 и релаксированного рудничного сплава П1-6А1-4У при амплитудной оценке уровня заданных пластических деформаций ϵ_1, ϵ_2 . Минсон установил, что при переходе на более высокий уровень нагружения (по деформации) выстраивалась зависимость не от отношения, а с небольшо-

или загибаем, причем также на величину заданную в том порядке с более интенсивно на более интенсивной ускоренной деформацией. Сказавшись также, что такая ускоренная деформация приводит к изменению статичекой усталой прочности от усталой при обычных напряжениях, причем величина скачка $\Delta \sigma_{-1} = 4V$ в виде величины была задана, что является логическим следствием. На рис. 30, а приложены кривые для алюминиевого сплава, а на рис. 30, б - для титанового. Таким образом, величина скачка деформации при деформации в статичекой усталой ускоренно деформированном конструктивном состоянии (то есть обобщено на рис. 30 усталая прочность, рассчитанная по формуле (3.7)). Показано, по-видимому, также предельно допустимое количество циклов с заданной статической деформацией, поскольку, как показано ранее, можно с деформацией выдерживать усталостное повреждение.

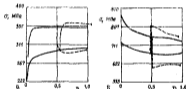


Рис. 30. Качество напряжений при циклическом нагружении с изменением уровня уровня нагружения: а - алюминиевый сплав; б - титановый сплав

В дальнейшем было выполнено много экспериментальной работы, в которой изучалась усталость материалов и конструкций, сварных узлов стальных конструкций при переменном (составленном из циклической составляющей) и случайном (характеризуемом статистическим распределением и частотным спектром) нагружении. Несмотря на это, общие закономерности вышеразобранной разницы и его развития еще не известны. Поэтому с тем, было достаточно убедительно показано, что при статическом "переключении" нагрузок результаты опытов в расчетных оценках на основе гипотезы Палмграна удовлетворитель-

но совпадают; редкое статичекой нагрузкой можно считать естественным статическим статическим природы самого явления, происходящим при случайном нагружении так же, как и при регулярном. По мере накопления статичекой нагрузки, по-видимому, можно будет более подробно характеризовать статистический характер явления. Например, если бы $B = 1$ можно означать абсолютную прочность $Q = 100\%$, а $B = 0,5$ - абсолютная прочность $Q = 10\%$.

3.7. Статическая циклическая деформация в зоне концентрации напряжений

Деформацией критерий вида (3.4) или приведенный в другой форме, можно применить для расчета конструкций, поскольку критерий характеризует сопротивление материала переменному нагружению. При этом надо учитывать следующие:

- для расчета материалов, характеризующихся деформационным критерием, может быть место только там, где деформация, возникающая в результате нагружения конструкции, является следствием, поскольку определять деформации в таких местах, т.е. в зонах концентрации напряжений. При упругоэластичных деформациях материалов таких зон возникает определенное напряжение в связи с сосредоточением в одном характере напряженного состояния;

- в пределах довольно ограниченного района конструкции деформация является (вспомогательная, что исключает деформацию в зоне усталой при общем уровне концентрации ряда мест деформации, соответствующий величине предела текучести материала) и при заданном числе циклов разрушения конструкции не происходит; речь может идти только о величине усталости;

- в большом количестве типичных концентраторов - сварных соединениях - имеется множество и различные дефекты, имеющие деформации у которых могут быть весьма значительными. При некотором отрывании в прочности дефекта область напряженно-деформационного состояния может в принципе быть исключена, однако в связи с неопределенностью и разномыслием деформаций в соединении элементов конструкции в инженерных оценках часто принимается предположение о том, что дефекты соединений можно усреднить по величине усталости соответствующей размерам, и долговечность конструкций в таких случаях опреде-

длина размеров зерна углерода, которая для металлов ... зависит от перехода в стадии быстрого переохлажденного роста.

В связи со сложением вычислений основными из методов определения количественных деформаций металлов концентраторы напряжений. Можно указать также способы:

- экспериментальный прием определения деформаций при сдвиге ... при изгибе, при кручении, изгибно-крутильном состоянии;

- приближенное определение численных деформаций на основании измеренных величин, определенных деформаций по параметрам структуры, структурным характеристикам структуры, максимальной напряженности и свойствам материалов;

- численные эксперименты, определение деформаций путем численного решения в соответствующей численной упругоэластической задаче.

Первый способ решения задачи возможен только в экспериментальных исследованиях как средство контроля деформации металлов, получаемых другими методами, а также при контроле качества массовой продукции с рядом ограничений.

Численные эксперименты можно считать самым общим приемом, однако его достоверность приближена к действительности только при определенных условиях продолжительности и затрат на осуществление опыта на ЭВМ (кроме того, численные эксперименты зависят от системы данных о свойствах материала при численном моделировании, а для его проведения необходимо присутствие соответствующего количества вычислительной емкости материала).

Приближенное решение задачи также требует исследования свойств материала и опыта в области объема, тем для решения задачи. В настоящее время известно уже несколько приближений для приближенного определения численных деформаций, весьма эффективных в сравнении с расчетами приемом. Для приближенного решения задачи также требуется определение концентрации напряжений, что можно сделать с помощью численных или экспериментальных методов. Приближенное определение деформаций дает вполне удовлетворительные для инженерных целей результаты.

Известно несколько вариантов определения численных упругоэластической деформации в зоне концентрации напряжений с помощью измеренных величин.

Основным приближением Фролова

$$\epsilon = \sigma_{\max} E / (K_{\sigma} - 1) (K_{\epsilon} - 1) \quad (3.8)$$

где σ_{\max} - величина (указанная амплитуда) номинального напряжения; K_{σ} - теоретический коэффициент концентрации напряжений, получаемый в результате решения соответствующей задачи Лапласа; K_{ϵ} - коэффициент концентрации напряжений при данном упругоэластическом напряженном состоянии.

Самое простой прием определения численных деформаций основан на использовании формулы Нейбера

$$K_{\epsilon}^2 = K_{\sigma} K_{\epsilon} \quad (3.9)$$

где K_{ϵ} - коэффициент концентрации деформаций в упругоэластическом напряженном состоянии, $K_{\sigma} = C_{\sigma} M_{\sigma}$ - для одноосного напряженного состояния.

Поскольку $K_{\sigma} = \sigma / \sigma_0$, формула (3.9) может быть записана так:

$$\sigma \epsilon = (K_{\sigma} \sigma_0)^2 / E \quad (3.10)$$

где σ, ϵ - напряжения и деформации, определяемые по экспериментальной диаграмме численного деформирования. Для нахождения ϵ надо по диаграмме рассчитать производную $d\sigma/d\epsilon$ в интересующей области:

$$\epsilon = \int (\sigma \epsilon) = \int (K_{\sigma}^2 \sigma_0^2 / E) \quad (3.11)$$

Формулы Нейбера позволяют инженеру в практических условиях достаточно и удовлетворительной точностью определять ϵ . Однако в некоторых случаях потребовалось внести в нее коррективы. Так, при расчете номинальных напряжений, данных в предельной точности, результатом опыта по (3.10) оказывается многократное занижение, а Е.А. Мазутовым для предельной точности

$$\lg(K_{\sigma} K_{\epsilon}) = \lg K_{\sigma} - (0.5) \ln \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_0}{\sigma_0} \right) \lg(K_{\sigma} K_{\epsilon}) \quad (3.12)$$

где M - показатель степенного уравнения для диаграммы численного деформирования, представляемой в виде $\sigma = A \epsilon^M$; σ_{\max} - номинальное напряжение в момент отрыва от предельной точности.

При деформации, данных в упругом, опыте концентрации напряжений по теоретическому коэффициенту концентрации соответствующего материала, поскольку некоторые исследователи в

(3.10) вместо K_0 использовать эффективный коэффициент концентрации напряжений (K_0), определяемый при условии равенства углам наклона концентрики с концентратором данного вида и Прямой углам наклона материала.

Формула Нейбера не учитывает также влияния постоянной составляющей нагрузки на пластические деформации материала в зоне концентрации напряжений. Правда, имеет место весьма слабое влияние такой составляющей на циклическую деформацию, и по нейтральной линии мы можем пренебречь, однако, если известен коэффициент симметричности спектра этого цикла, его можно отразить в расчетной величине $\bar{\sigma}$.

Согласно Гайбу, циклическая деформация в конструкции при средней нагрузке $\bar{\sigma}_m$, обусловленной действием постоянной составляющей нагрузки, может рассчитываться по формуле:

$$\epsilon = \left(K_0^2 \bar{\sigma}_m^2 / E \right) + K_0 \bar{\sigma}_m / E, \quad (3.13)$$

где $\bar{\sigma}_m$ — величина, определяющая амплитуду деформации при симметричном цикле по формуле (3.11); K_0 — параметр, определяемый экспериментально.

В ряде работ отдают предпочтение величине $\bar{\sigma}$, позволяющей рассчитывать деформации на поверхности зоны концентрации напряжений для конструкций, изготовленных из свариваемых сталей:

$$\epsilon = \bar{\sigma} \left[1 + A (K_0 \bar{\sigma} / \bar{\sigma}_T)^B \right], \quad (3.14)$$

где $\bar{\sigma}$ — условная упругая деформация $\bar{\sigma} = K_0 \bar{\sigma}_m / E$; $\bar{\sigma}_T$ — условное безразмерное напряжение $\bar{\sigma}_T = 1,25 K_0 \bar{\sigma}_T / \bar{\sigma}_T$; A — величина, определяющая величину среднего напряжения на окружности сечения цилиндрического гистерезиса; приближенно $A(\bar{\sigma}_m) = -A_0(1 + 1,5 \bar{\sigma}_m / K_0 \bar{\sigma}_T)$; β и A_0 — эмпирические параметры; $\beta = 1,2$, $A_0 = 0,2-0,3$.

Как видно из приведенного обзора, наиболее просто результаты можно получить с помощью формулы Нейбера. В том случае, когда данные обзоры отсутствуют, формула (3.10) определяет деформации вполне точно для симметричных и несимметричных циклов при увеличении амплитуды напряжений и концентрации напряжений; причем последнее означает, что максимальные напряжения можно получить только при отсутствии деформации в материале.

3.3. Расчет долговечности элементов конструкции по теории концентратора трещины усталости

Связанная с сопротивлением материала переменному упруго-пластическому деформированию, возникающая в последние годы, потребность не только более полно оценить процесс подготовки усталостного повреждения материала конструкции, чем это было достигнуто в рамках классического подхода, но и установить количественные взаимосвязи напряжений на стадии концентратора трещины от свойств материала, геометрии и особенностей нагруженных конструкций. Расчетные взаимосвязи, приведенные ниже, отражающие наиболее существенные стороны влияния усталости материала конструкции, позволяют сформировать деформационный метод расчета срока усталостной долговечности элементов конструкции, в котором в качестве физического критерия повреждения приняты величина трещины усталости.

Появление трещины усталости, как уже отмечалось выше, не означает наступления окончательного состояния конструкции, для многих конструкций угрозы прочности, возникающие могут возникнуть трещины значительной протяженности. Однако, как будет показано при обсуждении работоспособности конструкций с трещинами, при неравномерном распределении сталей, являясь температурой возможно значимое разрушение, даже если трещина имеет незначительные размеры. В этом отношении рассмотренный физический критерий может использоваться для оценки долговечности конструкции.

Отметим, что пока не существует единой границы между стадией концентратора и распространения трещины в конструкции, поскольку размеры трещины, составляющие эту границу, зависят от метода определения и оценки, что в дальнейшем и на основе теории стадии концентратора будет определено по трещинам равной протяженности.

Получим теперь математическую модель усталостного повреждения на стадии концентратора трещины. Согласно Э.В. Болотину, можно разработать эту модель на основе критерия циклического (3.7), преобразовав ее с учетом того обстоятельства, что максимальные напряжения имеют неравномерное распределение.

Допустим, что процесс нагружения сущностной конструкции

уменьшается (что практически выполняется почти всегда). В результате можно указать среднее число нагруженных конструкций N_{Σ} , которое поддается ограничению в дальнейшем. Тогда среднее число выходов напряжения в малом интервале $(\sigma_{\Sigma} - 0,5d\sigma_{\Sigma}, \sigma_{\Sigma} + 0,5d\sigma_{\Sigma})$:

$$N(\sigma_{\Sigma}) = N_{\Sigma} \rho(\sigma_{\Sigma}) d\sigma_{\Sigma}$$

где $\rho(\sigma_{\Sigma})$ - плотность вероятности максимальных напряжений в конструкции, учитывающая долговременное распределение. В результате интеграл (3.7) заменяется интегралом:

$$N_{\Sigma} \int \rho(\sigma_{\Sigma}) / N(\sigma_{\Sigma}) d\sigma_{\Sigma} = D. \quad (3.10)$$

Если указать среднее время выхода напряжения T_{Σ} , то для общего нагружения перейти к формуле ресурса конструкции:

$$T = N_{\Sigma} T_{\Sigma} = D T_{\Sigma} / \int \rho(\sigma_{\Sigma}) / N(\sigma_{\Sigma}) d\sigma_{\Sigma}. \quad (3.11)$$

Значения $N(\sigma_{\Sigma})$ можно характеризовать количеством нагружений при данном максимальном напряжении до выхода предела в момент быть определенном по формуле (3.4), а для расчета статистической деформации можно использовать одну из зависимостей (3.8) - (3.14). Если взять $\Delta\epsilon$ по формуле (3.10), тогда

$$N(\sigma_{\Sigma}) = c^{1/n} (f / K_{\Sigma}^2 \sigma_{\Sigma}^2 / E) - 2\sigma_{\Sigma} / K)^{-1/n},$$

а для расчета долговечности можно получить:

$$T = c^{1/n} D T_{\Sigma} / \int_{\sigma_{\Sigma}^{min}}^{\sigma_{\Sigma}^{max}} \rho(\sigma_{\Sigma}) (f / K_{\Sigma}^2 \sigma_{\Sigma}^2 / E - 2\sigma_{\Sigma} / K)^{-1/n} d\sigma_{\Sigma}. \quad (3.17)$$

Определив предел выносливости, нижний предел, очевидно, зависит от предела усталости в концентрации напряжений. Последующие показывают, что при неустойчивом нагружении выносливости ниже предела усталости до некоторого уровня, порядка $0,5 \sigma_{\Sigma}$, становится неактуальной. В то же время теоретической коэффициент концентрации не характеризует предел усталости конструкции для всего спектра эффективной коэффициент K_{Σ} , который вообще меньше теоретического. Приближенно оба фактора можно рассматривать как компенсирующиеся и тогда $\sigma_{\Sigma}^{min} = \sigma_{\Sigma} / K_{\Sigma}$. Верхний предел определяется максимальным возможным максималь-

ного напряжения в момент отхода, параметров статистического распределения и продолжительности внешнего воздействия, от числа нагружений N_{Σ} . Полагая вероятность одновременного исчерпания ресурса равной $Q = 1 / N_{\Sigma}$, по долговременному распределению можно найти σ_{Σ}^{max} .

Следует заметить, что число нагружений, способных вызвать усталостное повреждение N_{Σ} , меньше общего числа N_{Σ} , оно зависит от последнего и от нижнего порогового уровня напряжений для конкретного ула σ^{min} .

Если долговременное распределение максимальных напряжений отвечает закону Вейбулла, то обеспеченность напряжением Q :

$$Q(\sigma \geq \sigma_1) = \exp(-(\sigma_1 / \sigma_0)^k),$$

где k, σ_0 - параметры распределения. Соответственно, обеспеченность нижнего предела интеграла (3.17):

$$Q(\sigma \geq \sigma_{\Sigma} / K_{\Sigma}) = \exp(-(\sigma_{\Sigma} / K_{\Sigma} \sigma_0)^k);$$

тогда количество нагружений, отвечающее усталостному выносливому улау конструкции:

$$N_{\Sigma} = N_{\Sigma} Q(\sigma \geq \sigma_{\Sigma} / K_{\Sigma}). \quad (3.18)$$

Зависимость верхнего предела от общего числа нагружений показывает, что усталостный ресурс конструкции должен рассматриваться как этот последовательных приближений.

В формуле (3.17) определены только основные факторы, определяющие долговечность при пороговом нагружении. Если известны дополнительные данные, при расчете долговечности можно учесть повреждение выносливой средой напряжений, даже если это напряжение - случайный процесс, статистически связанный (или не связанный) с основным пороговым нагружением комплексной процессуальной; можно отразить влияние масштаба концентратора (см. (3.14)), остаточных сжимающих напряжений и других факторов.

Формула (3.17) или ее варианты могут использоваться и как основа для расчетного проектирования конструкций, т.е. для определения размеров сечений или очертаний деталей конструкции в зонах концентрации напряжений, которые обеспечены бы требуемый ресурс улава или обеспечены в целом. Для этого целесообразно фиксировать N_{Σ} и найти путем последовательных

приближений, например, теоретический коэффициент концентрации напряжений для простейшего угла; коллигативные приближения в этом случае необходимы для выполнения условия (3.17). "Защрапнение" N_0 представляет еще и в том отношении, что это позволяет получить в результате расчета K_0 с максимальной достоверностью в связи со сложной формой угла. На основе зависимости (3.17) можно быть подстроены в более общей статистической модели углах конструкции, в которой все параметры должны рассматриваться как величинами статистически константами: крайняя критическая деформированная нагрузка, крайний угол угла, теоретический коэффициент концентрации напряжений, параметры распределения констант нагрузки и т.д.

Глава 4

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИН УСТАЛОСТИ

4.1. Критерии предельного состояния конструкции

Положение трещины усталости в конструкции судового корпуса, как уже отмечалось выше, далеко не во всех случаях определяет исход конструкции из строя. Опыт показывает, что во многих районах судового корпуса, так как стенки имеют сложную форму, трещины в местах прохода балки набора, в пластичных обшивках ускоренной конструкции и других местах, могут обнаруживаться трещины, которые являются опасными в отношении прочности конструкции только при максимальной протяженности повреждения. Эти трещины чаще всего возникают в сварных соединениях, поддерживая в зоне повышенных напряжений в предельных пределах, у стальных. При этом в районе сварного соединения наиболее неблагоприятным образом складываются различные геометрической и металлургической неоднородностей, структурных напряжений на соединительном материале параметрам нагрузки. Кроме того, в самом соединении возможны дефекты - подрезы, подтеки, шлаковые включения, которые можно удалять трещинами усталости такой же протяженности. На рис.31 показан разрез крестообразного сварного соединения, где продольная связь прерывается на пересечении падающей полостью - подрезом, расширяющейся при росте трещины продольной связи. На рис.32 изображены уста-

ловые линии обшивки, нанесенных на пластину литой обшивки прохода "Полонизин" (постройки 1943 г. типа "Тайберт"). В первом случае (рис.32,а) трещина усталости возникла в зоне коррозионного повреждения на наружной поверхности (перед лангетой литой обшивки судно эксплуатировалось около 25 лет); во втором (рис.32,б) трещина образовалась у края впа, соединяющего лангету обшивки с пластиной фанера, в тех местах, где имелись линии поверхностные дефекты - подрезы. На продольном разрезе видно, что в соединении фанера и обшивки имеется подрез, но стальной корпус трещины благодаря ориентации вдоль нагрузки.



Рис.31. Надрез в крестообразном соединении (случай АМ-01)

Отсюда, для конструкции с дефектным соединением через судно будет определяться распространением трещины до опасного размера или до размеров, ухудшающих механическую эффективность конструкции. Сложность дает весьма малым значением и значению факторов, влияющих на распространение трещины усталости, а также разработку эмпирического метода расчета роста трещины, поскольку трещина определенного размера может отечь опасной для конструкции.

Нельзя забывать также и о том, что критерии предельного состояния конструкции с трещиной в предельном состоянии.

Г. При механико-теоретической пластичности материала, низкой температуре и динамическом характере нагрузки имеет про-

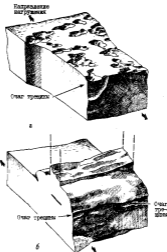


Fig. 23. Schematic diagrams of concrete crack patterns, corresponding to different stages of the process of "collapse" (type "collapse"): a - ordinary cracks in concrete elements; b - cracks in concrete on the surface of concrete elements and (also

may be unstable), macroscopic ruptures of concrete, like cracks, the appearance of which makes rupture, more or less inevitable.

2. In the case of ultimate strength of concrete, the ultimate strength of concrete and the rate of increase in volume of concrete - increase in size of pores and other defects of concrete, in rupture of concrete at the end of the process of rupture in the case of concrete, the appearance of which makes rupture inevitable, macroscopic deformations. Ultimate strength of concrete is given by Eq. 23, for F_{max} - ultimate strength of concrete, F_{max} - maximum macroscopic rupture.

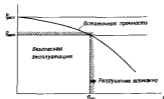


Fig. 24. Relationship of ultimate strength of concrete to length of crack.

3. In the case of some cracks, the rate of increase in volume of concrete may be very high, and the rate of increase in volume of concrete may be very high.

4. In the case of some cracks, the rate of increase in volume of concrete may be very high, and the rate of increase in volume of concrete may be very high.

On the other hand, the rate of increase in volume of concrete, and the rate of increase in volume of concrete, may be very high, and the rate of increase in volume of concrete may be very high. The rate of increase in volume of concrete, and the rate of increase in volume of concrete, may be very high, and the rate of increase in volume of concrete may be very high.

4.2. Скорость роста трещины усталости

Обычно при изучении закономерностей роста трещины в образцах или конструкциях (или их моделях) рассмотрению подлинности трещины и соответствующее количество циклов нагружения или время нагружения, если нагружение переменного. На этих данных строятся так называемые кинетические кривые, отражающие темпом образом зависимость продвижения трещины от числа нагружений эквивалентной амплитуды или образцы при определенной номинальной амплитудности. Специальные кинетические кривые показаны на рис.34. Глубина или протяженность трещины a_n и соответствующее число нагружений N_n , от которых ведется отсчет, зависят от кинетической зависимости эксперимента средствами рассматриваемой трещины (уменьшенной метод, метод акустической эмиссии, метод измерения тока, проникающих красок и других). Конечно, если трещина в конструкции находится вальцованном состоянии, то ее протяженность будет значительно отличаться от данных экспериментального контроля. На кинетических кривых обычно выделяется область ускоренного развития трещины (участок А-В) и ускоренного нестабильного роста (участок В-В', рис.34).

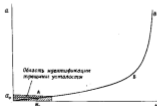


Рис.34. Кинетические кривые трещины усталости

С целью выявления параметров, определяющих рост трещины усталости, принято рассчитывать графическим дифференцированием кинетической кривой скорости роста трещины усталости

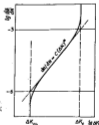
da/dN и найти зависимость ее от усталой силы. Обычно большое число предположений для описания такой зависимости, однако большинство из них относятся только к частоте усталости и не обладает необходимой общностью. Из числа зависимостей, отвечающих удовлетворительно опыту трещиночки, наиболее популярную Паркса - Эрдаса, которая отражает весьма простую связь между скоростью распространения трещины усталости, логарифмическим параметром, отражающим условия нагружения, и особенной характеристической напряженно-деформированного состояния материала в окрестности концы трещины - коэффициентом интенсивности напряжений. Наиболее простая зависимость в следующем виде:

$$da/dN = C (\Delta K)^m, \quad (4.1)$$

где C и m - экспериментально определенными для каждого материала величинами; ΔK - размах коэффициента интенсивности напряжений, определенный размахом, удвоенной амплитудой нагружения, трансформированного вида от трещины.

Как следует из (4.1), зависимость Паркса - Эрдаса в координатах $\lg \frac{da}{dN}$ - $\lg \Delta K$ изображается прямой (рис.35) и

темпы приближенно отражает такую зависимость, получаемую обработкой кинетической кривой. С использованием (4.1) экспериментальная кривая замещается прямой, темнее отрезком прямой, как показано на рис.35, ограниченным слева пороговым значением ΔK_{th} , которое определяет начальную трещину некоторой протяженности при данном нагруженном состоянии, и справа - критическим значением ΔK_c , при достижении которого трещина распространяется нестабильно, с большой скоростью. При выполнении определенных условий пороговое и критическое

Рис.35. Зависимость скорости роста трещины от ΔK

ческие значения коэффициента упругости напряжений пластически деформированного материала. Влияние характеристик сопротивления данного материала процессу разрушения.

Формула (4.1) получена в результате обработки данных испытаний ряда конструктивных материалов при пластической деформации пластинки, причем по условиям опыта полное разрушение не осуществлялось. Поскольку при снятии трещины замедляется, при ударе деформированного материала флюс состоит в напряжении не может быть поврежденной. Однако даже при весьма умеренных напряжениях у кончика трещины возможно образование пластических деформаций вследствие высокой концентрации напряжений, что при разгрузке и при снятии замедляет образование остаточных напряжений перед трещиной, способствующих ее продвижению. Поэтому формулы (4.1) применимы и для оценки продвижения трещины при компрессионных нагрузках, меньших 0,5. Параметры β и n для некоторых материалов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры уравнения Пораса - Эвенса

Вид материала	β , МПа	β_0 , МПа	C	n
Малоуглеродистая сталь	230	225	$2,73 \cdot 10^{-14}$	3,3
Малоуглеродистая сталь	-	-	$4,33 \cdot 10^{-9}$	3,07
Сталь А57Н А36	-	488	$3,90 \cdot 10^{-12}$	3,80
Сталь BS 4360	380	320	$1,14 \cdot 10^{-12}$	3,00
Сталь АМг	180	300	$6,09 \cdot 10^{-11}$	2,70

Как видно из приведенных в таблице данных для малоуглеродистой стали, особенно значительные различия возможны в значениях C — на несколько десятичных порядков, в связи с чем можно считать примерно только во времени и скорости роста трещин. Они и та же конструкции, такие образцы, может объяснить существенно различие сопротивляемого развитию трещины в зависимости от материала. Особенно, для обработки конструктивных узлов и для расчета распространения трещины в конструкции необходимо определять значения коэффициента пластичности материалов.

4.3. Коэффициент упругости напряжений

Рассмотрим бесконечную пластинку, деформированную равномерно распределенными усилиями в одном направлении, с трещиной, расположенной перпендикулярно направлению действия усилий.

Следует, что при этом поверхности трещины сдвигаются, трещина расширяется. Таким образом сдвиг пластичности пластинки под действием нагрузки I , как показано на рис. 36. При пластическом деформировании материала у кончика трещины возможно развитие зоны трещины в состоянии первоначальной трещины, чему соответствует мода I . При данном напряженном состоянии и заданном пластическом деформировании разрушение происходит по первоначальной, расположенной под углом примерно 45° к направлению растягивающих усилий, и тогда реализуется мода II .



Рис. 36. Моде развития трещины

На стадии стабильного роста трещины в напряженном состоянии пластине приращивая нагрузку I , систему в дальнейшем будет рассматриваться только процедура определения коэффициента упругости напряжений β_0 , где мода I есть трещина мода.

Если пластичность пластинки малой толщины в соответствующем напряженном состоянии, напряжении в пластине с трещиной можно найти решением аналитического уравнения

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (4.2)$$

при заданном виде функции напряжений $F(x, y)$ в соответствующей граничной области. Согласно Вестергорду, функция $F(x, y)$, характеризующая напряженное состояние пластинки с трещиной, может быть представлена в виде:

$$F(x) = \beta_0 \left[\frac{1}{2} \varphi(x) \right] + \gamma \ln \left[\frac{1}{2} \varphi(x) \right], \quad (4.3)$$

где $x = z + iy$;

$$\bar{z} = \frac{d}{dz} \bar{z} ; \quad z = \frac{d}{dz} z ; \quad z' = \frac{d}{dz} z . \quad (4.4)$$

Компоненты напряженного состояния определяются каноническими:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} ; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} ; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} .$$

Тогда

$$\sigma_x = 2a_2 z - y \operatorname{Im} z' ; \quad \sigma_y = 2a_2 \bar{z} + y \operatorname{Im} z' ; \quad \tau_{xy} = -y \operatorname{Re} z' . \quad (4.5)$$

Примем условия при таком выборе (4.3) функции напряжений удовлетворяют: $\sigma_x(\infty, y) = 0$; $\sigma_y(x, \infty) = 0$, а на контуре трещины $\sigma_y(-a \leq x \leq a, 0) = 0$; $\tau_{xy}(x = \pm a, 0) = 0$.

Подходящее решение, отвечающее условиям неограниченного возрастания напряжений σ_y у кончика трещины, имеет следующий вид:

$$\Phi(x) = \sigma \sqrt{r} (1 - a^2/r^2)^{3/2} . \quad (4.6)$$

Рассмотрим область неограниченности перед кончиком трещины в плоскости начальных координат на fronte трещины (рис.37), кончик: $x=a$, $x+a=2a$; обозначим $x-a = r \exp i\theta$, тогда

$$x = \sigma \sqrt{r} \exp(-i\theta/2) / (2r)^{3/2} ; \quad (4.7)$$

и

$$x' = -\sigma \sqrt{r} \exp(-3i\theta/2) / (2r)^{3/2} . \quad (4.8)$$

Поскольку $y = r \sin \theta$, подставим (4.7) и (4.8) в (4.5), получим:

$$\sigma_x = \frac{\sigma \sqrt{r}}{r^{3/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin^2 \frac{\theta}{2} \sin^2 \frac{3\theta}{2} \right) + \text{асимптотические члены} ;$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma \sqrt{r}}{r^{3/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \sin^2 \frac{3\theta}{2} \right) + \dots ;$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma \sqrt{r}}{r^{3/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} + \dots .$$

Из этих формул видно, что напряжения пропорциональны по-

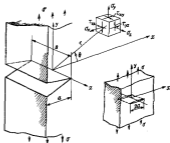


Рис.37. Обозначения и определение коэффициента K_I

стоящей или длиной выходя величины $\sigma \sqrt{r}$ и обратно пропорциональны \sqrt{r} , т.е. по мере приближения к кончику трещины ($r \rightarrow 0$) неограниченно возрастают. Постоянная величина $\sigma \sqrt{r} / K_I = K_I$; величина коэффициента интенсивности напряжений. Вспомогательное обозначение, применяемое для напряжений можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \psi_1(\theta) , \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \psi_2(\theta) , \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \psi_3(\theta) . \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Формулы (4.9) относятся только к названным асимптотическим членам, пропорциональным $1/r^{3/2}$; с учетом асимптотических членов напряжения вычисляются в виде

$$\sigma_x = C_1(r/a)^{3/2} \psi_{11}(\theta) + C_2(r/a)^{5/2} \psi_{12}(\theta) + C_3(r/a)^{7/2} \psi_{13}(\theta) + \dots ,$$

одномо на мере притяжения и величину трения только одной части в виде независимой стандартной функции, поэтому для оценки напряжений в области, окружающей носок трещины, используются формулы (4.9).

Следующим образом определяются напряжения вблизи носка трещины при других видах смещения краев трещины, модах II и III, причем аналогичным образом вводятся коэффициенты интенсивности напряжений, соответствующие этим модам, K_{II} и K_{III} .

При условии, что под действием данной нагрузки смещение краев трещины можно считать суммируемым воле мол, напряжения определяются независимо:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left(k_1 \cdot \sigma_{ij}(\theta) + k_2 \cdot \sigma_{ij}(\theta) + k_3 \cdot \sigma_{ij}(\theta) \right).$$

Главной задачей задачи является сделать возможное следующее выводы:

- доведение к виду напряжений вида (4.9) поля, по заданному смещению $1/\sqrt{r}$ у конца трещины, на изменение значения коэффициента интенсивности напряжений;
- если совмещено поле напряжений вносил элемент в величину коэффициента интенсивности, представляющее значение K может быть найдено суммированием значений, полученных в результате независимого рассмотрения действия полей напряжений;
- если область с трещиной подвергается действию произвольной нагрузки и функции I в формуле (4.3) известны для заданного их вида, то соответствующие I можно суммировать и по результату определить напряжения и деформации.

Эти положения широко используются при отыскании значений K_I в практических задачах. Отметим, что понятие коэффициента интенсивности напряжений предложено И.Муромом в 1957 г. Размерность коэффициента интенсивности — сила/длина^{3/2}.

4.4. Метод определения коэффициента интенсивности напряжений

Как указано выше, коэффициент интенсивности напряжений — наиболее яркая размерность для одной из характеристик напряженности тела с трещиной, наиболее полезна в отношении с другими характеристиками, характеризующая состояние напряженно-

сти на скорости роста трещины пластичности. Известно также, что при определенных условиях зависимость некоторого значения коэффициента интенсивности в теле с трещиной при нагружении соответствует закону известного разрушения крутильной или изгибной трубки. Такое значение коэффициента интенсивности напряжений называется критическим или критическим разрушения и является характерной свойство материала, например, предел текучести. Поэтому оценка значения коэффициента K_I (при раскрытии или других видах смещения краев трещины) для известных конструкций, в которых в процессе эксплуатации возможны возникновение трещин.

Как следует из формулы (4.9), коэффициент интенсивности напряжений может быть определен, если известны напряжения в произвольной точке тела на малом расстоянии r перед фронтом трещины. Решать задачу существенно упрощается, если заданное можно увидеть трещиной трещины. Тогда $\theta = 0$, $k_1(\theta) = 1$, $k_2(\theta) = 0$ и $k_3(\theta) = 0$. Следовательно, при этом достаточно знать напряжения $\sigma_{ij}(r, \theta)$ или вообще значения любого одного компонента напряжения в направлении, совпадающем с осью трещиной трещины. Так как при этом отбрасываются несущественные члены в формулах, определяющих напряжения, очевидно, что коэффициент интенсивности напряжений будет определен тем точнее, чем ближе к кончику трещины найдено напряжение σ_{ij} . Поэтому общий прием нахождения K_I заключается в определении напряжений σ_{ij} в нескольких точках перед трещиной по ее трещиной, вычисления $K_I(r_i)$, где r_i — расстояния i -й точки от вершины трещины, и экстраполяция найденных значений к $r=0$, как показано на рис. 28.

Как следует из следующего, для расчета K_I может использоваться любой метод определения напряженного состояния тела с трещиной: экспериментальный (метод фотоупругости, статический методный измерений, фото, фото-

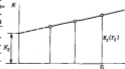


Рис. 28. Схема нахождения коэффициента интенсивности напряжений

протектограм, кружки лапки, и т.д.), теоретический (метод сеток, конечных элементов, граничные интегральные уравнения и др.). Точность определения коэффициента интенсивности напряжения при использовании любого из указанных методов зависит от точности измерения или точности теоретического решения в связи с принятой математической моделью. Так, например деформацией материала перед трещиной полагается пренебречь тем точнее, чем меньше база тензорезисторов и чем ближе они располагаются перед передней трещиной; точности решения задачи методом конечных элементов зависит от размеров элементов и от принятой физической модели материала.

Определение параметров и скорости развития трещины тоже дает возможность найти значения коэффициентов М-тензора напряжения. Известные формулы Коши и уравнения (4.5) и (4.6) приводят к зависимостям для плоской деформации:

$$u = \frac{K_I}{E} (r/2a)^{3/2} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \nu r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right);$$

$$v = \frac{K_I}{E} (r/2a)^{3/2} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu - \nu r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right),$$

которые можно использовать для вычисления K_I .

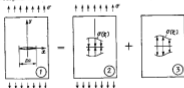


Рис. 39. Наложение принципа суперпозиции

В ряде задач для расчета K_I используется принцип суперпозиции, который можно назвать следом (рис. 39).

Согласно этой схеме исходная задача (1) заменяется двумя вспомогательными, из которых задача (2) при соблюдении условия равновесия по длине имеет "свободный" соответствующий области без трещины, а решение задачи (1) таким образом однозначно решено задачей (3). Последнее может быть найдено по

формуле Э.Н.Садова:

$$K_I = (\pi a)^{-1/2} \int_0^a \sigma(\xi) \sqrt{(a+\xi)(a-\xi)^{3/2}} d\xi, \quad (4.10)$$

где ξ - координата, отсчитываемая вдоль трещины.

К числу широкоприменяемых методов определения скорости роста трещины, основанного на коэффициенте интенсивности напряжения, относятся следующие: метод бесконечной пластины с центральной сквозной трещиной, уменьшенной на половину, соответствующая конкретным особенностям рассматриваемого объекта:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi} M_0(a) M_1(a) \dots, \quad (4.11)$$

где $M_0(a)$ - поправка, при помощи которой учитывается влияние конечности пластины напряженной в зоне концентрации на величину K_I , M_1 - другие поправки, смысл которых показан ниже.

Вспомогательные поправки, что удельно-нормальные решения для объектов с малыми изменениями при подрастании трещины по достижении можно получить, если в качестве M_0 принять отклонение необходимого главного напряжения по сквозной трещине в номинальному σ .

Вместо и другие формы нахождения коэффициентов интенсивности напряжений, смыслы которых можно найти в специальной литературе, например в [3], где также приведены данные о коэффициентах интенсивности в простейших задачах.

4.5. Формы фронта трещины

Важно рассмотреть трещины с произвольными фронтами, перпендикулярными плоскости пластин, так называемые сквозные трещины. Однако если разрушение начинается у дефекта сквозной трещины, трещина возникает на свободной поверхности и развивается внутрь. Статистической моделью формы фронта трещины в разных отходах их роста показала, что фронт поверхности трещины можно считать полуэллиптическим. На рис. 40 изображены примеры трещин, возникающих в распространяющихся от веры сварного шва.

Разнообразие начального изгиба поверхности трещины. Обозначим a - углубление вершины трещины, малая полуось эллипса, $2c$ - длина трещины, выходя на поверхность, большая ось эллипса, φ - угол, отсчитываемый от поверхности и характеризующий положение точки на фронте трещины.

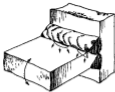


Рис. 40. Неупругая трещина у сварного соединения

Приближенное выражение для коэффициента интенсивности напряжений, полученное врезке на основании анализа напряженности течи с внутренней полостью в форме эллипсоида, имеет вид:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\sin^2 \varphi + (a/c)^2 \cos^2 \varphi \right]^{1/4} / \Phi, \quad (4.12)$$

$$\text{где } \Phi = \int_0^{\pi/2} (1 - (1 - a^2/c^2) \sin^2 \varphi) d\varphi = 1.78 + 0.392 a^2/c^2.$$

Из формулы (4.12) видно, что K_I зависит от угла наклона трещины на фронте трещины, достигая максимума при $\varphi = \pi/2$ ($\sigma > a$), $K_I^{\text{max}} = \sigma(\pi a/c^2)^{1/4}$, и минимума при $\varphi = 0$, $K_I^{\text{min}} = \sigma(\pi a^3/c^3)^{1/4}$. Отсюда следует, что при подкритической трещине в полукруглой области должна происходить сгусткация на фронте.

В области внешней трещины по мере продвижения в противоположной поверхности податливость участка перед вершиной трещины в окрестности $\varphi = \pi/2$ увеличивается и соответственно коэффициент интенсивности должен расти. Значения напряжений для K_I в такой задаче приведены в Справочнике [1].

4.3. Зона пластической деформации

У вершины трещины при $r \rightarrow 0$ напряжения неограниченно возрастают, создавая неограниченно высокую концентрацию давлений при деформации материала напряжением. Однако рост внутренних усилий ограничивается способностью конструкционного материала пластически деформироваться, поэтому у вершины трещины образуется пластическая зона, размеры и форма которой за-

висит прежде всего от характера напряженного состояния материала перед вершиной трещины.

Появление пластической зоны в принципе изменяет характер напряжений у вершины трещины и добавит направлениям сжатия, что в процессе возникновения интенсивности напряжений. Однако при небольших размерах зоны изменения в характере напряженного состояния заметны только в малой области, что позволяет напряженность остального упруго деформируемого материала определять в рамках K_I . Присутствие пластической деформированной области перед остком трещины обычно учитывается введением эффективной длины трещины при вычислении K_I , который определяется следующим образом. Пусть концентратор напряжений σ_y перед вершиной трещины, выходящий на разрывные линии дуговой задатки (рис. 41, а). На рисунке $\sigma_y = \sigma_0$ можно найти условие протекания пластической области: $\sigma_y = K_I^2 / 2\pi a_0^2 = \sigma^2 a / 2a_0^2$.

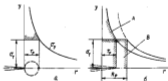


Рис. 41. К определению эффективной длины трещины:
а - "упругое" распределение напряжений;
б - схема перераспределения напряжений

Важными же размерами пластической зоны должны быть большие r_p , так как должно происходить перераспределение напряжений в трещине пластической области и материал должен воспринять нагрузку, соответствующую амплитуде напряжений в области на рис. 41, а, в результате чего величина напряжений σ_y примет вид, показанный на рис. 41, б. Соответственно размер пластической области

можно считать, что при этом в "узкой" зоне области I на рис.4.1,4) в условиях концентрации пластической области в плоском напряженном состоянии (диаграмма напряжений см. рис.4.1,3):

$$Q_A = \int_0^{\delta} \sigma_y(x) dx, \quad Q_B = \sigma_y R_p;$$

на участке $Q_A = Q_B$ следует $R_p = 2 \tau_{0.2}$. Этот результат можно использовать для оценки "уравновешенной" длины пластической области пластической зоны на участке R_p в направлении при условии $\sigma_y = \sigma_x$ тогда определяем, используя понятие эффективности пластичности материала. Эффективной длиной трещины при этом $l + l_p = Q_B$, в коэффициент эффективности (детерминант) плоской трещины в бесконечной пластине):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi} Q_B = \sigma \sqrt{\pi} (l + R_p). \text{ Поскольку } R_p = \sigma^2 / 2\sigma_y^2, \text{ то}$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi} l \left(1 + 0.5 \sigma^2 / \sigma_y^2 \right)^{1/2} = \sigma \sqrt{\pi} M_p, \quad (4.13)$$

где $M_p = (1 + 0.5 \sigma^2 / \sigma_y^2)^{1/2}$ - поправка на влияние пластической зоны. При плоской деформации эта поправка меньше $M_p = (1 + 0.17 \sigma^2 / \sigma_y^2)^{1/2}$; цилиндрическое напряжение приводит к меньшему упрочнению материала, уменьшению величины пластической зоны в, следовательно, меньшему увеличению поправки. По данным Райса в книге "пластическая" поправка при цилиндрическом напряжении в режиме плоского напряженного состояния $M_p = (1 + 0.06 \sigma^2 / \sigma_y^2)^{1/2}$.

Основа может сложиться впечатление, что при упрочнении номинальной напряженности элементов конструкции элементами пластического материала при различных коэффициентах концентрации можно пренебречь. Это не так, если рассматриваются детали с трещинами трещины, выходящие за пределы зоны концентрации напряжений. Однако зона пластической трещины проходит под действием этой зоны, при определении M_p надо учитывать с местным повышением напряжений. Из (4.11) и (4.13) следует $M_p = (1 + M_0^2 \sigma^2 / 2\sigma_y^2)^{1/2}$.

Как показывают результаты численного анализа формирования пластической зоны в поле напряжений в условиях концентрации напряжений в плоском напряженном состоянии, приближенную оценку поправки при цилиндрическом напряжении дает зависимость:

$$M_p(\alpha) = (1 + M_0^2(\alpha) \sigma^2 / 4\sigma_y^2)^{1/2}. \quad (4.14)$$

Помимо уровня номинальной напряженности конструкции в области местного повышения, концентрации напряжений, на скорость распространения трещины существенное влияние оказывает и такая факторы, как геометрия цела конструкции, отностительные размеры напряжений, наличие ограниченной среды, случайный характер нагружения.

Конечно, если не рассматривается круг проблем, которые возникают при изучении распространения трещины усталости в сварных конструкциях. Например, при анализе трещины, расположенной в сварных соединениях, следует учитывать с металургическими неоднородностями материалов соединения, присутствие дефектов, которые могут иметь в на месте разрушения, и на трещины трещины; зона сварочных напряжений сложным образом взаимодействует при подрастании трещины. Такие проблемы составляют предмет исследования в области на рывки усталости курса, поэтому здесь рассмотрены вопросы только перемещения или особенности усталой реальной конструкции.

4.7.1. Асимметричная форма нагружения

Простейшая формула, описывающая подрастание трещины - уравнение Паркса - Эрдогана (4.1) - основана на равномерном напряжении образца при цилиндрическом растяжении или сжатии без перемещения точки усталости, следовательно, может использоваться для расчетов только при усталости усталости. В самом деле, если в цела нагружения полагается фаза сжатия, это приводит к соединению берегов трещины и усталости восстановления материала. Если не учитывать эффекта пластического деформирования области у вершины трещины, то следует признать, что увеличение роста должно стать менее эффективным в целах нагружения со сжатием. Соответственно этому рассуждением выдвигается предположение в уравнении (4.1) признать наличие ΔK , определяемого только растягивающими усилиями.

Дальнейшей идеей показала, что такая зона не отстает от равномерности роста трещины при асимметричном нагружении. Подложная пластической зоны перед вершиной трещины предотвращает полную сжатие на берегов после разрушения, поэтому

Фазы слитки возникают образованием остаточных напряжений релаксацией в результате продольного сжатия металла берегов трещины. Величина этих напряжений зависит от жесткости металла и асимметрии нагрузки, от пластических свойств материалов; их появление фактически увеличивает размах распространения напряжений у кончика трещины. Следовательно, при учете пластической деформации высказается, что фазы слитки не могут рассматриваться как нейтральные в смысле распространения трещины.

Как и на стадии зарождения трещины, концентрация цикла нагружения характеризуется средним напряжением $\sigma_{cp} = \sigma_{max} - \sigma_0$, где σ_0 — амплитудное значение номинального напряжения, или коэффициент асимметрии цикла $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$.

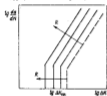


Рис. 42. Влияние средних напряжений на распространение трещины

Великие асимметрии нагружения на ранней стадии трещины усталости для разных материалов проявляются в разной степени. Для алюминиевых сплавов это явление, нарастающее с увеличением скорости роста трещины, наиболее существенно; у высокопрочных сталей оно заметно слабее. Образ слитка алюминия показан на рис. 42, где показано, что с увеличением асимметрии нагружения с преобладанием растяжения (увеличением R) снижается пороговое значение эффективности жесткости ΔK_{th} и возрастает темп роста трещины da/dN .

Вместо рода математических возможностей, с помощью которых устанавливается влияние асимметрии на скорость роста трещины. Наиболее просто при удовлетворительном описании подрастания трещин и распространения уравнение Вайхера

$$da/dN = C K_{max}^m \Delta K^{-n}, \quad (4.15)$$

формулы Вайхера

$$da/dN = C A^m (\Delta K)^m / (\Delta K_0 - \lambda \Delta K), \quad (4.16)$$

где $\lambda = 1/(1-R)$; ΔK_0 — критическое значение ΔK , соответствующее разрушению при одностороннем нагружении; параметры C , m и n в этих формулах определяются в результате статистической обработки экспериментальных данных.

4.7.2. Остаточные сварочные напряжения

Остаточные напряжения формируются в основном благодаря изменению свойств материала в сварном соединении в процессе охлаждения наплавленного металла после образования соединения. В результате обора сварной конструкции в процессе пластических свойств материала после остаточных напряжений в целом сплавляется, по-видимому, довольно сложным. В настоящее время в нем трудно выделить как наиболее существенные две составляющие: местные остаточные напряжения, утончающиеся в окрестности конкретного соединения, и напряжения, обусловленные оборами сварки и утончающимися в масштабе сечения сооружения, так называемые реактивные напряжения.

Для анализа металлургических процессов наиболее важным напряжением первой группы, поскольку трещины усталости обычно возникают в сварных соединениях, в особенности находящихся в области концентрации напряжений. Следует подчеркнуть, что чаще всего эти области совпадают с областями сварных соединений, где наиболее вероятны дефекты соединения, например, у оцинкованной стали, образует на границах сварки в металлах.

Поискание остаточных напряжений этой группы удобно проводить на примере полосы с продольным сварным швом (рис. 43). Особенности соединения электродной сваркой заключаются в том, что холодные швы быстро, причем так быстро,



Рис. 43. Распределение остаточных напряжений в шлосе

что в теоретических оценках обязательно принимается - металлы, содержащиеся в расплавленном металле. С этого момента начинается течение сварочных процессов:

- нагрев соединяемых частей благодаря теплоотдаче от расплавленного металла,
- охлаждение металла или вследствие теплоотдачи в соединяемые части и окружающую среду,
- старение металла расплавленного металла, причем теория фаз образуется у краев соединяемых деталей с относительно низкой температурой; в процессе охлаждения изменяется структура металла, происходит фазовые превращения,
- одновременно с отводением тепла расплавленного металла повышается его сопротивление деформации и увеличивается его объем.

В результате вок в соединяемой зоне оказывается расплавление, согласно экспериментальным данным - до предела текучести материала (рис.43). Разумеется, если величина соединяемых деталей втрое превышает диаметр, то последний будет расторгнут в нижней стенке, о чем следует помнить при выборе образцов для установления жесткости.

Состав сварного соединения можно делить на зоны, отличающиеся металлургическими, электрохимическими свойствами и механическими свойствами (рис.44).



Рис. 44. Зоны сварного соединения: 1 - основной металл; 2 - зона термического влияния; 3 - зона сплавления; 4 - зона влияния; 5 - основной металл

напряжений; здесь наблюдается образование "горячек" и "холодных" трещин в процессе формирования соединения или по его завершению.

Важная особенность остаточных напряжений первой группы - частичное или полное их исчезновение релаксацией в результате расоны или вторичных перегрузок. Так как остаточные напряжения являются от существовании относительно небольшой растянутой области - шва, в котором эти напряжения достигают предела текучести, то при малых перегрузках расплавления или переменной напряжении следует ожидать пластического деформирования материала шва. Нагрузка из пластического состояния по взаимодействию с соседним упругодеформируемым участком соединения способна привести к частичному снятию шва растяжения и, соответственно, уравниванию его или подя снятия. Все более эффективным можно предположить процесс релаксации в зоне концентрации напряжений, всегда в этой зоне находится сварное соединение. Концентрация напряжений способствует ускорению пластического деформирования в швах под действием нагрузки и создает условия для появления пластической деформации после нагрузки и переменной напряжением нагрузки в последующем полукруге, таким образом формируя процесс циклического деформирования. При малых напряжениях, превышающих удельный предел пропорциональности, обнаруженный на диаграмме циклического деформирования материала, релаксация происходит в швах полукруга. Зависимость ширины шва от температуры и периода в упругоэластическом состоянии при растяжении от среднего напряжения способствует ускорению релаксации остаточных напряжений. Схема этого процесса изображена на рис.45.

Распространение влияния весьма важно для оценки расчета усталостного сопротивления сварной конструкции и нуждается в подробном экспериментальном изучении. Однако для оценки под-расчета трещин, возникающей в сварном соединении, необходимо в зоне концентрации напряжений, можно с небольшой точностью в безопасном степеню не учитывать влияние остаточных напряжений этого соединения. Рассчитываемые на этом основании кристаллы трещин ограничиваются наличием остаточных напряжений фактического соединения, поскольку этот процесс иницирует перпендикулярное направление остаточных напряжений и вызывает их перераспределение. Поэтому если требуется рассмотреть трещин, поперечное сечение перпендикулярно сварному соединению, необходимо учитывать влияние остаточных напряжений при малом коэффициенте жесткости.

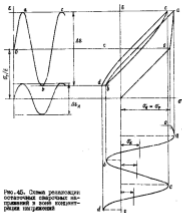


Рис. 45. Схема релаксации остаточных напряжений в зоне концентрации напряжений

4.7.3. Случайный характер нагружения

К настоящему времени нет достаточно обширных и детальных исследований роста трещин при случайном нагружении. В опубликованных работах описываются эффекты перегрузок разных знаков на фоне регулярного нагружения и только в некоторых работах содержатся результаты изучения подрастания трещин в условиях эксплуатационного нагружения.

Установлено, что эксплуатационные перегрузки растяжения создают остаточные напряжения сжатия у вершины трещины благода-

те релаксации между деформированиями, что существенно замедляет рост трещины после перегрузки. Этот эффект зависит от соотношения перегрузки и амплитуды "фонового" нагружения: чем выше это отношение, тем он заметнее. Попростому индикатором роста трещины и результатом релаксации напряжений остаточных напряжений является скорость роста трещины востанавливающегося (рис. 46), как видно по данным испытаний алюминиевого сплава ВДМ-5АВ, для кривой А соответствует циклическое растяжение с параметрами: $\sigma_{\text{с}} = 33 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{ср}} = 32 \text{ МПа}$; кривой В - то же поле перегрузки 130/-29 МПа; кривой С - то же циклическое растяжение плюс перегрузка 130/0 МПа.

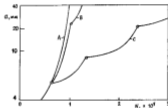


Рис. 46. Эффекты перегрузки растяжением

Как видно на рис. 46, перегрузка сжатия, следующая после растяжения (кривая В) частично снимает эффект удержки, зато при растяжении без последующего сжатия влияние является вполне отрицательным. Иногда перегрузки растяжением применяются для продления ресурса конструкций, содержащих возможные трещинообразные дефекты.

Среди немногих работ, посвященных изучению сопротивления материалов распространению трещин при случайном нагружении, упомянем исследования Барсона [21] и ДеВиза и Барсона [22]. Барсон на основании анализа результатов испытаний скорости роста трещины установил, что среднее значение скорости имеет быть напрямую зависимостью вида (4.1), в которой вместо рас-

мала коэффициентом интенсивности напряжений стандарт этой модели.

Добел и Вайсон подтвердили возможность использования гипотезы Паламгрина - Каффера для анализа спектров данных в расчетах долговечности при усталостном случайном нагружении. Заметили, что в условиях морского воздуха внешнее воздействие влаги соответствует этому определению, рассматривается как ускорительное по критерию, характеризующему полосу частот вероятностного спектра, в которой происходит основная энергия процесса.

4.7.4. Влияние коррозии на рост трещин усталости

Это влияние связано со своей природой и еще не изучено полностью. Известна теория коррозии, согласно которой в агрессивной среде у металла трещины проявляются электрохимический эффект, ускоряющий процесс роста трещины; отдельные результаты опыта удается объяснить тем, что при закрытии трещины в малом объеме воды у ее вершины содержится такое-то количество кислоты, наличие которой способствует разрушению материала. Некоторые материалы подвержены выносу водорода окружающей средой, разлагающегося в результате интенсификации растворения водорода у вершины трещины. Схема на рис. 47 показывает

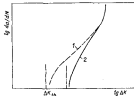


рис. 47. Ускоренный процесс для трещин при испытании в морской воде (1) и в сухой атмосфере - (2)

образ трещи в агрессивной среде: снижение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений; увеличение скорости роста трещины, особенно при малых значениях интенсивности напряжений.

С увеличением ΔK влияние коррозии становится все менее заметным,

что объясняется фактором времени - в ходе коррозионно-усталостных испытаний при малом ΔK процесс разрушения протекает сравнительно короткое время, основным становится основной фактор, а влияние агрессивной среды проявляется в незначительной степени.

Основная роль среды для стальных конструкций и морских сооружений, следует иметь в виду сплавов. В расчетах долговечности конструкций не могут использоваться данные, подобные приведенным на рис. 47, полученные при испытаниях образцов, так как при таких испытаниях материалует только, как трещина, основной фактор, но не фактор времени, что принципиально существенно, когда рассуждают влияние окружающей среды. Возможно, фактор времени при перегрузках проявляется не столь заметно, как при умеренных нагрузках, однако он должен непременно учитываться при анализе процесса коррозии.

4.8. Оценка долговечности деталей конструкций на стадии распространения трещины

Сущность фактора, влияющего на рост трещины усталости, можно сформулировать общим критерием безразмерного (допущение) подрастворения трещины. При этом согласно рассмотренным представлениям используются следующие предположения:

- в качестве подложной модели роста трещины на стадии ускоренного распространения используется формула Парсона - Эриксона (4.1):

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (4.17)$$

- при анализе конструкций, изготовленных из обычных стальных сталей, можно пренебречь эффектом асимметрии нагружения;

- величина коэффициента интенсивности напряжений определяется коэффициентом концентрации напряжений или приближенным способом, с учетом влияния, формирующей детали формы, особенностей напряженного состояния металла, наличия жесткой деформации, количества циклов, свободной поверхности и т.д. Например, для трещины, возникшей в зоне концентрации напряжений, коэффициент интенсивности напряжений можно дать определенное значение:

$$\Delta K = M_0(a) \sqrt{r \sqrt{a}} \quad (4.18)$$

где $M_0(a)$ — константа, учитывающая влияние концентрации напряжений на величину ΔK ;

б) — для оценки усталостной повреждаемости, которая связана с некоторой прочностью трещины усталости. Применяется гипотеза линейного суммирования повреждений. Формулы имеют следующий вид:

$$T = T_0 \left(\int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{r \sqrt{a} \Delta K} \right)^2 \quad (4.19)$$

где T — время до появления трещины заданной протяженности или глубины.

Параметры, которые равнодействуют при заданном уровне усталостной прочности трещины усталости, рассмотрим в параграфе 4.1.

Интеграл трещины Париза — Эрдогана (4.17), получим:

$$\begin{aligned} n(t) &= \frac{1}{2} \int_{a_0}^{a_f} da / (M_0 a)^m = \\ &= \frac{1}{(2M_0)^m} \int_{a_0}^{a_f} da / (a \sqrt{a})^m \quad (4.20) \end{aligned}$$

Подставляя этот результат в формулу (4.19), получим зависимость для расчета усталостной долговечности конструкции на стадии распространения трещины усталости от заданной исходной протяженности a_0 до заданной предельной (критической) длины a_f :

$$T = \frac{T_0 D}{(2M_0)^m} \left(\int_{a_0}^{a_f} \sigma^m r \sqrt{a} \int_{a_0}^{a_f} M_0(a) \sqrt{a}^m da \right)^2 \quad (4.21)$$

где $r(a)$ — плотность распределения вероятности для максимального напряжения; T_0 — средняя продолжительность (париз) разрушения; D — материалный параметр, мера повреждаемости конструкции в Париз-Эрдогане 3,4.

Максимальное напряжение, верный предел интегрирования (4.21) можно определить, если закон распределения максимальных напряжений; нижний предел ($a_{0,cr}$) связан с критической или начальной длиной трещины a_0 и некоторым значением кон-

станты надежности нагруженной $\Delta K_{crit} = 10 \sigma_{max} \sqrt{r \sqrt{a_0}}$, тогда

$$\Delta K_{crit}^2 = \Delta K_{0,cr}^2 / r \sqrt{a_0} \quad .$$

Формулы (4.21) можно использовать не только для расчета долговечности, но и для оценки эффективности таких технологично-материальных, или набор материалов конструкций, элементов конструкции деталей и т.д., а также для решения задач расчетного проектирования узлов сварного корпуса.

В последнем случае рассуждения могут быть следующие: надо выяснить, что усталостная долговечность T весьма чувствительно меняется при небольших изменениях номинальной напряженности, концентрации напряжений, и в данном случае — прочностности трещины r , которую можно считать. Поэтому для максимизации любого из этих параметров при фиксированных остальных целесообразно долговечность системы увеличить за счет, равнообразному увеличению времени существования конструкции или равномерному перемоду. Часто на основании статистики возможных нагрузок полагают, что примерно за 25 лет среднее значение порядка 10^6 нагружений, т.е. $T/T_0 = 10^6$. Для получения средних оценок меры повреждаемости в (4.21) можно принять равной единице и тогда из этой формулы следует условие

$$Q \sigma_c^{2m} \int_{a_0}^{a_f} \sigma^m r \sqrt{a} \int_{a_0}^{a_f} (M_0(a) \sqrt{a})^m da da = 1, \quad (4.22)$$

которое может использоваться для оценки допустимого уровня концентрации напряжений, номинальной напряженности, расчетной длины трещины также по образцу, как и с учетом стадии образования трещины. В (4.22) Q — вероятность появления максимального уровня номинальных напряжений, $Q = 10^{-6}$.

При решении практических задач несложно объединить упомянутый период усталости конструкции и стадии распространения трещины: количество нагружений, необходимое для развития повреждения до заданных размеров в (4.19), должно включать часть, соответствующую фазе зарождения трещины, определенную зависимостью (3.10), и часть, характеризующую распространение трещины (4.20). Следовательно, суммарное число нагружений равно:

$$\begin{aligned} n(t) &= C_1^{2m} (r \sqrt{a_0} \sigma^2 / \sigma_c)^2 - 2 \sigma_{cr} / M_0 \sqrt{a_0} + \\ &+ \int_{a_0}^{a_f} (da / (M_0(a) \sqrt{a})^m) / (C_1 \sigma^2)^m \quad (4.23) \end{aligned}$$

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА РАСТРОВАНЫМ ТРЕЩИНАМ

5.1. Определение параметров, характеризующих сопротивление материала росту трещин усталости

Среди различных указаний, широко используемых для определения скорости роста трещин усталости, чаще всего встречаются указания Паркса - Эрдасага (4.1), Волтера (4.16) и Формана (4.16). В практических приложениях чаще всего применяют формулу (4.1), в которой скорость распространения материала определяется выделенными параметрами C и m . Эти величины могут быть получены только опытным путем. Времена исследования сопротивления материала усталости показывают существенную зависимость результатов опыта от конструкции образца, вида нагружения, характера напряженного состояния материала в области, где развивается усталостное разрушение, для одного и того же материала. Поэтому одной из задач практических работ является применение методов измерения разрушения для стандартизации методов испытаний, которая обеспечит быстрое сопоставление данных, определяемых разными исследователями, установление критерия подобия материалов разрушения для возможности переноса результатов лабораторных опытов на натурные объекты.

Из-за отсутствия информации образцов выделены два типа, разработанные автором стандартной методики испытаний в масштабе разрушения в 1960 г. в Бразилии в США. Это образцы для испытаний при циклическом изгибе сосредоточенной силой и компактный образец для испытаний на циклическое растяжение.

Испытания при изгибе цинка - цинка прикладываемой осевой силой. Схема образца и видовой чертеж показаны на рис. 48. Стандартная форма прореза с концами, выполненная конусной, обеспечивает формирование фронта трещины герметично в боковой поверхности образца. Это важно для определения действительного размера разрушения элемента. Если бы прорез делался прямолинейно и гер-

метично, то боковые поверхности образца, то возможно было бы возникновение трещины в середине толшины образца или у его боковой поверхности, что затруднило бы измерения длины трещины, как показано на рис. 49.

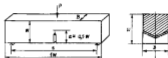


Рис. 48. Образец для испытаний при изгибе

Как следует из формулы (4.1), для выделенных параметров C и m необходимо определить скорость роста трещины и соответственно величину коэффициента интенсивности напряжений. Для выделенной скорости надо регистрировать длину трещины (удлинение a) в цикле циклов нагружения, а также коэффициент интенсивности напряжений, как следует из материала параграфа 4.4., однозначно соответствует при определенной геометрии образца величине нагрузки и длине трещины. Длина трещины измеряется от нижней поверхности образца до ее вершины, т.е. фактически измеряет в осевом удлиненном прорезе и действительную длину трещины, ее остаток вычитается, когда она удалена от основного прореза приблизительно на 0,5-1,0 мм, чтобы исключить влияние остаточных напряжений после механической обработки. Если опыт проводится с целью определения критического величина коэффициента интенсивности напряжений, то циклическое нагружение на этой стадии прекращается. При усталостном испытании измерения длины трещины продолжают до тех пор, пока траекторий трещины на изгибе отклоняется от первоначального направления, чему соответствует изменение характера напряженного состояния материала от по-



Рис. 49. Схема развития трещин в образце при изгибе

ской деформации в плоскому напряженному состоянию с заметной частью пластического деформирования.

Коэффициенты пластичности напряжений подсчитываются с помощью формулы:

$$K = \frac{P_2}{E_0 W_0} (2,9(a/W)^{3/2} - 4,6(a/W)^{3/2} + 21,8(a/W)^{5/2} - 37,6(a/W)^{3/2} + 38,7(a/W)^{5/2}), \quad (1.1)$$

В испытании компактного образца на растяжение. Конструкция образца и схема его нагружения показаны на рис.50. Прорез для образования трещины здесь такой же формы, как и у образца, изготавливаемого при нагибе. Испытание проводится при продольном растяжении, причем разгрузка полностью не делается, чтобы избежать перемещений образца. Растягивающее усилие производится в образцу с помощью талочек, которые вставляются в отверстия в образце с обеих сторон, закрепленные в зажимах монтажной машины. Длина трещины, как и у предыдущего образца, измеряется от нижней поверхности сальника и включает частичную трещину и прорез.



Рис.50. Компактный образец для растяжения

Для определения длины трещины, расположенной со стороны на боковой поверхности образца применяются разные методы: измерения электрическим сопротивлением образца; измерениями вольтметра подраствором трещины; измерениями потенциальности отрицательного ультрафиолетового свечения, в действ. же чаще всего используется микрозондом. Коэффициенты пластичности напряжений для компактного образца подсчитывают по формуле:

$$K = \frac{P}{E_0 W_0} (29,6(a/W)^{3/2} - 180,0(a/W)^{5/2} + 355,7(a/W)^{3/2} - 107,7(a/W)^{5/2}), \quad (1.2)$$

где P - величина растягивающего усилия.

5.2. Определение критического значения коэффициента пластичности напряжений

Критическое значение коэффициента пластичности напряжений, называемое часто величиной разрушения (Strength toughness), при определенных условиях становится не только критерием перехода трещины усталости в фазу нестабильного роста, но и критерием крупного или катастрофического разрушения, которое не обязательно должно происходить в трещине усталости. Серого цвета, критическое значение K_{Ic} при статическом и монотонном нагружении не обязательно совпадает, так как разные продолжения трещины различаются в зависимости от вида нагружения. Поскольку сложная конструкция в связи с ростом трещины усталости может работать быстрее которой усталости или меньшим разрушением крупного или катастрофического типа, критическое значение коэффициента пластичности напряжений рассматривается чаще как критерий начального разрушения.

Важнейшие значения примеров крупного разрушения конструкции показаны на рисунке по крайней мере при обстоятельствах, указанных образом для всех случаев, а именно:

- величина температуры окружающей среды;
- особенность нагружения-деформированного состояния среды, в которой началось разрушение;
- концентрация напряжений в месте возникновения трещины.

Важно также отметить, что величина разрушения всегда увеличивается с ростом скорости, хотя расчетные номинальные напряжения в них не превосходят допустимых. В конструкциях трещины возникают у острых углов сварки линии на растянутой стороне, у швов в шпунтах, у концов длинных продольных шпунтов, окружающих шпунты, в дефектах стыков сварных швов.

Важными являются также, что основными факторами, определяющими частоту крупного разрушения, являются температура окружающей среды. Выяснилось, что крупность не есть свободная, поскольку при более высокой, а также состоянии, в котором металл оказывается при определенных обстоятельствах раз-

линии факторов. Сложность и крупное разрушение наблюдаются как при высшем методе, при проектировании и изготовлении конструкции, а снижение температур сильно осложняет процесс этой сложности.

Вместе с тем, сложность и крупное разрушение наблюдаются, например, стандартной техникой, применяемой в авиационных районах СССР, не приспособленной и исключаются в других местах условия; как и в промышленности, что повышает крупное разрушение конструкции корпуса судна и вертолетной и стандартной конструкции может быть исключена.

Средствами критического момента коэффициента теплопроводности напряжений как основы сложности крупного разрушения конструкции должно, следовательно, исключаются в точном температурной окружающей среды при температуре, т.е. линия должна находиться между температурой среды (в промышленном образце) и критическим коэффициентом. Однако не только это обстоятельство должно быть учтено, но и при этом методе в крупное разрушение может и его критический момент. В основном, линия об исключении значений коэффициента теплопроводности напряжений в зависимости от величины содержания примесей в металлах должна в стали мало, но есть сведения об исключении ударной вязкости в зависимости от этих факторов.

В металловедческих отношениях сложность изготовления стали и крупное разрушение характеризуется следующими обстоятельствами:

- крупное разрушение в большей мере подвержены стали, структура основы которых состоит из раствор углерода в железе, кристаллическая решетка которого относится к типу объемно-центрированного куба;

- чем крупнее зерна феррита (раствора углерода в железе), тем выше сложность стали и крупное разрушение;

- распределение элементов (Fe, C) в виде сложных степеней по границам зерен феррита наиболее существенно снижает сопротивление стали крупному разрушению;

- наличие примесей олодом образуют сложнейшие по сопротивлению стали крупному разрушению и исключаются виды.

На рис. 51 показаны кривые влияния различных примесей, газов и легирующих элементов на критическую температуру, при которой наблюдается резкое падение ударной вязкости стали. По

систему влияния на сопротивление крупное разрушение примесей можно разделить на три группы: исключение сопротивления, почти не влияющие на него и сложнейшие обстоятельства.

К первой группе относятся элементы азот, сера, фосфор, кремний - все они резко снижают сопротивление крупному разрушению стали. Интерметаллическая связь содержит больше фосфора, чем марганец, и поэтому она более крупная. Присутствие азота и серы увеличивает сложность стали и крупное разрушение в основном конструктивные стали исключаются при марганцеобразии на образцах крупного размера металла.

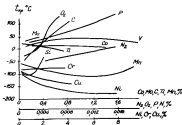


Рис. 51. Влияние примесей на критическую температуру для стали

Расширение стали - осложняется ее от азота, серы - является важной процедурой в смысле повышения температуры эксплуатации. Способ расширения также имеет влияние на его предельные значения сопротивления растяжению как алюминия, а на прочность, так и в этом случае критическая температура повышается (см. рис. 51). Поэтому, т.е. пороки расширения стали поэтому имеет существенный недостаток перед алюминиями и другими металлами.

Во второй группе относятся элементы, сера и фосфор. Их присутствие в стали образует сложные соединения, а их сложность и крупное разрушение исключаются металлы

смазочного.

В третьи группы входят марганец, медь и никель. Пластичная деформация для получения высокопрочных крупнозернистых. При содержании 8-10% никеля в стали крупная дисперсия практически невозможна, и такая сталь применяется для изготовления сосудов для хранения и перевозки сжиженного газа. Суммарно легированная сталь ЮНИСН, например, содержит всего 0,35% никеля.

Таим образом, при экспериментальном определении значения коэффициента пластичности напряжения следует принимать во внимание, что он состоит из:

- определенной толщины стального образца;
- определенного химического состава стали;
- определенного температурного интервала;
- определенной скорости деформации.

Для обсуждения методов определения критического значения коэффициента пластичности напряжения (K_{pl}) воспользуемся известными фактами испытаний, т.е., разумеется, эти не повторяются все многообразие стандартных испытаний [7], III.

Определение K_{pl} осуществляется путем сферической деформации. Во-первых, эта величина устанавливается по радиусу или, эквивалентно при известной кинематической пластической деформации материала, как это и показано продолжением с приростом крупного разрывания. Пластическое деформирование материала у вершины трещины эквивалентно заданному напряженному состоянию. На боковой поверхности образца напряжения $\sigma_x = 0$, и режим пластического течения можно определить как:

$$\sigma_y - \sigma_x = 2\tau_y,$$

где τ_y - предел текучести при сдвиге. Пластическая деформация будет осуществляться сдвигом по плоскостям, расположенным примерно 45° к направлению y и x , как схематически показано на рис.52. По мере удаления от боковых поверхностей напряжение σ_x возрастает, и пластическая деформация будет проходить при углах

$$\sigma_y - \sigma_x = 2\tau_y$$

по плоскостям, наклонным примерно под углом 45° к направлению x и y , как изображено на рис.53. Протяженность

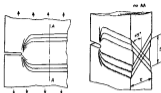


Рис.52. Пластическое деформирование при плоском напряженном состоянии

век пластической деформации перед вершиной трещины существенно различается по толщине образца, и ее стороны деформируются по рис.54.

Означает, что чем толще образец при сдвиге и тем же напряжениях, тем большая часть материала будет в рамках плоской деформации и тем больше будет проявляться в среднем способность материала деформироваться пластически. Согласно расчетным средам пластичности материала, вернее, ее значением на характер разрывания, можно трансформировать, имея минимальное удлинение:

Рис.53. Пластическое деформирование при плоской деформации

$$\delta = 1,5(K_{pl}/\sigma_y)^2, \quad (5.3)$$

где δ - толщина образца.

Общий характер зависимости K_{pl} от толщины иллюстрирует схема рис.55, показывающая, что при малой толщине разрывания

ние сопровождается пластической деформацией в соответствии с законом с увеличением толшины образца пластическая деформация проявляется только у боковых поверхностей и практически разрушения отсутствуют.

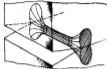


Рис. 54. Корка зоны пластической деформации у вершины трещины

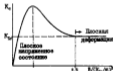


Рис. 55. Зависимость K_{I0} от толщины образца

Дано установлено, что сопротивление материала крупоу разрушению существенно зависит от скорости нагружения. Эта зависимость также определяется резким снижением критического значения коэффициента интенсивности напряжений при увеличении скорости нагружения. Известно также, что падение температуры ниже определенного уровня также приводит к резкому падению сопротивления ряда сталей и, соответственно, сплавов K_{I0} . На рис. 56 показана зависимость K_{I0} и K_{II0} (динамического эквивалента K_{I0}) от температуры для двух сталей — малоуглеродистой SML ($\sigma_s = 300$ МПа, $\sigma_b = 448$ МПа, $\psi = 78\%$) и легированной А543 ($\sigma_s = 700$ МПа, $\sigma_b = 765$ МПа, $\psi = 73\%$) [23]. Заметно также, что с увеличением прочности, которое обычно

характеризует предел текучести, K_{I0} обычно не возрастает.

Требование (5.3) должно не всегда соблюдаться, так как для его выполнения могут потребоваться образцы такой толщины, которая практически не применяется в технике, или такая толщина плиты не могут быть изготовлена; наконец, для очень толстых образцов необходим специальный способ укладки в печь и выемки том. Поэтому возможно и целесообразно определять K_{I0} для данной толщины материала, по крайней мере, для пластической характеристики сопротивления материала разрушению.

характеризует предел текучести, K_{I0} обычно не возрастает. Если допустить, что для основной трещины в бесконечной растянутой пластине $K_I = \sqrt{\sigma \sqrt{a}}$, становится ясно, что при наличии дефектов увеличение максимальной предельно допустимой толщины может создать угрозу внезапного разрушения для конструкций, изготовленных из высокопрочных сталей.

Для иллюстрации в табл. 6 приведены значения K_{I0} для некоторых конструктивных материалов.

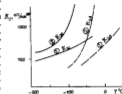


Рис. 56. Зависимость K_{I0} и K_{II0} от температуры

Таблица 6

Характеристики прочности некоторых материалов			
Материал	σ_s , кгс/мм ²	K_{I0} , кгс/мм ^{3/2}	Максимальная толщина, мм
Малоуглеродистая сталь	34	700	2130
Легированная сталь 9005	55	94	7,3
Титановая сталь 6Al-4	122	122	3
Высокопрочная сталь 4340	135	130	1,7

Для точного определения K_{I0} необходимо иметь условия, при которых происходит разрушение, а для установления характера деформации материала требуется измерить деформации образца. Правильно измерить растяжение трещины с помощью специального деформометра, изображенного на рис. 57. Температурный коэффициент на гребне бытового деформометра, соединенный с жесткой фиксацией и подключенный к дифференциальному измерению. Второй измерительной скалкой под, измерительные условия, в результате выполняется длительный процесс разрушения, который в зависимости от свойств материала, толщины образца, темпе-

расту испытание может быть одного из трех видов (рис. 56):

- 1) практически упругой деформации, максимальная нагрузка определяет расчетное усилие для определения K_{10} ;
- 2) разрушения с подрастанием трещины, в качестве расчетного принимается максимальное значение усилия на пути деформации δ^* ;
- 3) разрушение сопровождается подрастанием трещины в пластической деформации.

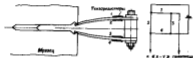


Рис. 57. Схема деформатора для измерения раскрытия трещины

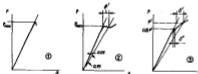


Рис. 58. Типы диаграммы разрушения

Пригодность результата опыта в подрастании окружности для расчета K_{10} оценивается следующим образом.

На основании анализа размерностей раскрытия трещины определяется зависимость:

$$\delta = C_1 P_0 / E, \quad (5.4)$$

где C_1 — постоянная — при чисто упругой деформации.

Пластическая деформация может упрощаться фактически упруго-линейной трещиной, как это рассмотрено в параграфе 4.5. Тогда раскрытие трещины $\delta = C_2 P(\sigma + \tau_p) / E$, где пластичность гомогенной зоны перед вершиной трещины $\tau_p = a(\sigma/\sigma_p)^2$, откуда следует

$$\delta = C_2 P_0 / E + C_2 P_0^2 a / E, \quad (5.5)$$

т.е. раскрытие, связанное с развитием трещины, пропорционально первой степени усилия, а перемещение от пластической деформации пропорционально P^2 . Поэтому на диаграмме $P - \delta$ проводится окружность, каская которой составляет 0,25 от начального линейного участка, определяется усилие P^0 , находят ось симметричного сечения δ^0 ; при нагрузке $0,8 P^0$ определяют "неупругое" сечение δ^* . Если при таком построении выполняется условие $\delta^* \leq 0,25 \delta^0$, то сечение считают результатом подрастания трещины в процессе разрушения, а тогда P^0 принимают для расчета K_{10} . Если $\delta^* > 0,25 \delta^0$, то раскрытие считают следствием пластической деформации и данные опыта отбраковывают.

5.3. Интеграл Рабел - Черепанова

В качестве характеристики напряженно-деформированного состояния материала у вершины трещины и критерия разрушения объекта с трещиной имеет использоваться не только величина коэффициента интенсивности напряжений, но также и величина, определяющая степень увеличения потенциальной энергии тела в результате подрастания трещины. Эта величина — интеграл Рабел - Черепанова.

Рассмотрим упругое тело, замкнутое объемом V и ограниченной поверхностью S . На ее части S_0 заданы перемещения u_i^0 , а на части S_1 — поверхностные нагрузки T_i . В тело введена трещина, ограниченная свободной от нагрузок поверхностью Z . Пусть в исходном состоянии I напряжений, деформации и перемещения равны $\sigma_{ij}^I, \epsilon_{ij}^I, u_i^I$. Допустим, что приложении внешних усилий увеличивается трещина на Δa (a — исходная длина трещины), а ее поверхность — на ΔX ; предположим, что объем полости при этом не меняется, трещина подрастает коллинеально и изотропными силами не нагружена.

В результате приложения деформации и перемещения точки тела принимают значения: $\sigma_{ij}^0 + \delta \sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^0 + \delta \epsilon_{ij}, u_i^0 + \delta u_i$.

Инд. и кинетическая потенциальная энергии тела при подростахих трещины. В состоянии I потенциальная энергия равна

$$P^0 = \int_V W(\epsilon_{ij}^0) dV = \int_{S_0} T_{\alpha i} u_i^0 ds,$$

где $W(\epsilon_{ij}^0)$ - плотность энергии деформации,

$$W(\epsilon_{ij}^0) = \int_0^{\epsilon_{ij}^0} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}.$$

В состоянии 2 потенциальная энергия

$$P^0 + \Delta P = \int_V W(\epsilon_{ij}^0 + \Delta \epsilon_{ij}) dV = \int_{S_0} T_{\alpha i} (u_i^0 + \Delta u_i) ds,$$

и тогда изменение потенциальной энергии:

$$\Delta P = \int_V (W(\epsilon_{ij}^0) - W(\epsilon_{ij}^0 + \Delta \epsilon_{ij})) dV + \int_{S_0} T_{\alpha i} \Delta u_i ds. \quad (5.6)$$

При этих рассуждениях предполагалось, что векторы силы $T_{\alpha i}$ не изменились при подростахих трещины.

Теперь рассмотрим плоскую задачу, например, плоское напряженное состояние тела с прямоугольной трещиной. Пусть начало координат располагается в вершине трещины, ось OX направлена вдоль нее; контур Z охватывает область, выделенную вершиной трещины. Изменение потенциальной энергии в результате единичного подростахих трещины:

$$\begin{aligned} -dP/d\alpha &= \lim_{\Delta \alpha \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta \alpha} \int_V (W(\epsilon_{ij}^0) + \Delta \epsilon_{ij}) \Delta \epsilon_{ij} - (W(\epsilon_{ij}^0) + \Delta \epsilon_{ij}) - \\ &\quad - W(\epsilon_{ij}^0) dxdy, \quad (5.7) \end{aligned}$$

где интегрирование по объему заменяю интегрированием по площади, которую охватывает контур Z . Если показать, что (5.7) можно записать в виде (доказательство приводится в [18], с. 225-226)

$$-dP/d\alpha = \int_{\Gamma} (W dy - (T_{\alpha i} \partial u_i / \partial x)) dx = J. \quad (5.8)$$

Если Γ - замкнутый контур, т.е. трещины нет, то $J = 0$. Величина J , характеризующая изменение энергии деформации области внутри контура Z при единичном подростахих трещины, называется интегралом Райса - Черепанова. Этот интеграл не зависит от плоского контура, что доказывается следующим образом. Рассмотрим замкнутый контур ABCDEA вокруг вершины трещины; интегрирование вдоль этого контура, очевидно, не-

зависит и результате: $J = 0$, так как на участках берегов трещины AB и CD $T_{\alpha i} = 0$, $dy = 0$, а интеграл по контуру ABCDEA может быть равен J -интегралу по контуру DEFA с обратным знаком. Здесь $T_{\alpha i}$ - проекция усилий на нормали к контуру, π -вектор скорости: $T_{\alpha i} = \sigma_{ij} \pi_j$.

Приведенные рассуждения показывают, что интеграл (5.8) не зависит от длины и формы контура Z , причем его утверждение справедливо для упругого и упругопластического напряженных состояний, последнее - в рамках деформационной теории.

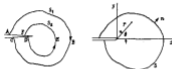


Рис.55. К доказательству независимости J от контура интегрирования

Если точка принадлежит области Ω , то потенциальная энергия деформации на единицу объема равна P/Ω ; следовательно

$$P/\Omega = \iint_{\Omega} W dx dy = \int_{\Gamma} T n dx. \quad (5.9)$$

Для упругопластического состояния материала P/Ω - положительная энергия, а W - результирующая плотность увеличения контурных нагрузок на тело с трещиной, которая определяется в нагруженном состоянии. Такое определение требуется из-за зависимости "пластической" реакции от истории деформации; согласно деформационной теории пластичности оно называется "кинетическим" определением J по (5.8).

Пусть имеется тело с "фиксированной точкой" приложения нагрузки, как показано на рис.56. В окрестности контура Z выделяется малый контур, охватывающий тело. Допустим, что определена при фиксированной длине трещины δ проекция зависимости перемещения δ точки приложения силы T от величины этой силы; тогда аналогичную зависимость можно получить, как и в пер-

ном состоянии, длина которой увеличивается на δa_1 ; $a + \delta a$ (см. рис. 60, б). Согласно определению интеграла Райса - Чарлсона площадь между этими кривыми равна $J\delta a$.

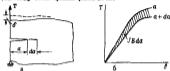


Рис. 60. Схема определения J -интеграла

Из всего рассуждения следует, что точное определение J требует микроскопического расчета упругопластического напряженного состояния в отдаленной подкритической трещине, поэтому для решения практических задач следует применять приближенный способ оценки величины J .

Можно предположить, что действительное поведение материала ограничено чисто упругим и жесткопластическим; так и кривая $\delta(T)$ (рис. 61, б) ограничена предельным, соответствующим упругому и жесткопластическому состоянию материала. При чисто упругой деформации

$$J = \delta = T^2 (\delta a / \delta a) / 2B, \quad (5.10)$$

где δ - податливость, зависящая от размеров трещины, геометрии рассматриваемого тела, свойств материала (E , ν); переменные точки приложения нагрузки $\delta = \delta T$. Отсюда в соответствии с (5.10) следует, что $J \sim \delta^2$, т.е. J -интеграл при данной длине трещины - парабола (рис. 62).

При жесткопластическом поведении материала деформации в направлении отступают до момента, когда нагрузка достигнет предельного значения $T_{пред}$, при котором деформация и перемещение δ возрастает неупругим образом, как показано на рис. 61.

Пусть имеется два состояния жесткопластического тела с трещиной: в одном - длина трещины a и соответствующая предельная нагрузка $T_{пред}$; в другом - трещина $a + \delta a$, предельная нагрузка $T_{пред} + \delta T_{пред}$. Тогда увеличение энергии деформации согласно

(5.8) равно:

$$J = - (\delta/B) \delta T_{пред} / \delta a, \quad (5.11)$$

где производная $\delta T_{пред} / \delta a$ определяется для данной длины трещины. Из (5.11) следует, что при жесткопластическом поведении материала J есть линейная функция перемещения δ , как показано на рис. 62. Следовательно, при маломасштабном пластическом течении материала у вершины трещины J можно находить по решению линейной задачи; при больших δ , когда предельная нагрузка достигнута, перед разгрузкой, J как функция δ становится нелинейной зависимостью с малым, отходящим к началу кривой $J(\delta)$

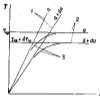


Рис. 61. Зависимость $\delta(T)$: (1) - при упругом деформировании; (2) - при жесткопластическом; (3) - действительная кривая

При жесткопластическом поведении материала, что иллюстрируется рис. 62. Чтобы найти зависимость $J(\delta)$ в "разрядной" области,

но использовать пластическую теорию Райса, определяем эффективную длину трещины $A_e = a + T_p$, где $T_p = (K_I \sigma_p)^2 / 2\sigma$ при плоском напряженном состоянии и $T_p = (K_I / \sigma_p)^2 / 6\sigma$ при плоской деформации. С учетом поправки можно получить приближенные оценки J -интеграла следующим образом:

- по формуле (5.11) рассчитывается зависимость $J(\delta)$ (примем на рис. 62 б);

- найдем интеграл "упругий" парабола с пластической поправкой для данной трещины. Для этого значения K_I и $\delta(T)$ надо определить для данного объекта; для стандартных образцов необходимо сослаться еще в справочной литературе;

- интеграл может служить характеристическим знаком структурной трещины при решении пластическом деформированном материале у ее вершины, как и K_{Ic} при маломасштабном пластическом

деформировании. При использовании интеграла Релея - Черасского в этом направлении отпадает требование, предъявляемое к точной образцу; такой пример можно привести для характерности описываемых разрушений материала малой и умеренной прочности, в частности, малопластичных сталей, алюминиевых и сплавов алюминия, магниевых сплавов, в основном, в строительстве. Кроме того, J можно использовать и в области распространения трещин усталости в такой же роли, как и коэффициент интенсивности напряжений. Для этого необходимо получить расчетно-экспериментальную кривую



Рис. 62. Зависимости $J(\delta)$: 1 - упругое поведение материала, 2 - действительная зависимость

образца в линейной области разрушения. В этом случае также потребуются расчетные определения зависимости $J(\delta)$, что несколько более сложно, чем найти $K(\delta)$.

Процедура определения J_0 , соответствующего разрушению в режиме монотонного нагружения, заключается в следующем:

- для образца данного типа надо найти на основе или расчетом зависимости $P-\delta$ для ряда длин трещины, в каждом случае фиксированных (рис. 63, а);

- для заданной величины порогового толчка приложить нагрузку и подсчитать площадь, ограниченную каждой кривой $P-\delta$. Эта площадь характеризует потенциальную энергию деформации образца (строго - только при упругом деформировании материала). Строится кривая изменения площади, отнесенной к толщине образца, в зависимости от длины трещины;

- по этим кривым графически дифференцированием или отложенный угол наклона касательной при длине δ можно

найти $J(\delta)$, а затем определить $J(\delta)$ при длине δ_0 .

Практически значение J_0 теперь можно уточнить по кривым пороговности, соответствующего материалу нестабильного разрушения.

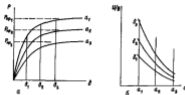


Рис. 63. К определению J -интеграла:

а - зависимости нагрузки - перемещение $P-\delta$;

б - потенциальная энергия на единицу толщины W_p в зависимости от длины трещины при фиксированных толщине b ;

в - J -интеграл в зависимости от перемещения δ для разных длин трещины



1. Справочник по прочностной механике корабля, т.2. Л.: С - Аэстропроект, 1982.
2. Справочник по прочностной механике корабля, т.1./Под ред. В.А.Шемельского. Л.: Судостроение, 1980.
3. БЕЛМАН С.В., РИЗЕН С.В. Прочность и разрушение судостроительных материалов и конструкций при переменном нагружении: Учебное пособие. - Л.: Изд. ЛОИ, 1981.
4. ПЕТЕРСОН Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977.
5. ГАРИЗД В.С. Концентрация напряжений в прерывистых осяхки воздушного корпуса. Л.: Судостроение, 1987.
6. Передачами судовых конструкций./ Бардашев Н.В., Ганжа Н.А., Волков В.В., Савкин В.В., Чебанов И.М. Л.: Судостроение, 1977.
7. БРОЕК Д. Основы механики разрушения. М.: Дашков и сыновья, 1980.
8. МАЛЮТОВ В.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981.
9. БОАСТОН В.В. Прогнозирование ресурса ядра и конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
10. МАКОВИЧ В.П. Различные методы исследования влияния сварочных деформаций и напряжений. Киев: Наукова думка, 1978.
11. ЮТ Д.В. Основы механики разрушения. М.: Мир, 1977.
12. КАНАКОВ А.В. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974.
13. БИДЖЕН Г.В. Определение статистической усталостной прочности конструкций. - Вопросы судостроения, 1982, вып.31, с.33-42.
14. КИОКОФИ Т. Научные основы прочности и разрушения материалов. Киев: Наукова думка, 1978.
15. СЕДОВ А.Н. Механика сплошной среды, т.2. М.: Наука, 1970.
16. НАДИН А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Металл. инж. журн., 1974.
17. ЧИРИКОВСКИЙ В.С., ПАЛЕЙ С.М. Основы теории надежности судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1980.
18. КОГАН В.И. Расчеты на прочность при напряжении, переменном во времени. М.: Машиностроение, 1977.
19. РОБЕРТС Р.Д.Е. The Physical Basis of Metal Fatigue. London, Blackie and Son Ltd, 1968.
20. КИРСТЕН Э.В., РОСТОВИЦКИЙ Д.М., СЕНКОВ И.И. Прочность корабля. Л.: Судостроение, 1974.
21. ВАЛСОН J.M. Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading in ASTM A514-2 Steel. ASTM INT 296, 1975, pp.149-167.
22. ВАЛСОН J.M., ВАЛСОН F. Random Load Fatigue of Welded Structures of Long Lives. Fatigue Testing & Design. Intern. Conference of the IIM, London, April, 1976.
23. КОСАМОТО Н., САДОН М., ФУКАИ Т. Study on the Dynamic Fracture Toughness of Steels. - Mitsubishi Heavy Industries Techn. Rev., Vol.42, No.2, 1975, pp.71-77.
24. Механика разрушения. Разрушение материалов. / Под ред. Д.Теплина. М.: Мир, 1979.
25. Механика разрушения. Разрушение конструкций. / Под ред. Д.Теплина. М.: Мир, 1980.
26. Механика разрушения. Быстрое разрушение, составленная труд./ Под ред. Р.В.Гольдштейн. М.: Мир, 1981.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
Глава 1. Критерии состояния и концентрации напряжений в судовых конструкциях	6
1.1. Критерии расчетного состояния судовых конструкций	6
1.2. Концентрация напряжений в точках углах корабельных конструкций	10
Глава 2. Циклическое деформирование металлов	21
2.1. Особенности деформирования металлов и сплавов при циклическом нагружении	21
2.2. Диаграммы циклического деформирования	23
2.3. Практические приемы получения диаграмм циклического деформирования	31
Глава 3. Закономерности усталости на стадии подготовки трещины	38
3.1. Критерии усталости при циклическом нагружении	38
3.2. Особенности деформирования материалов в конструкции	43
3.3. Критерии выхода трещины усталости	45
3.4. Наблюдение процесса усталостного разрушения	52
3.5. Теория усталости	56
3.6. Закономерности усталости металлов при случайном нагружении	60
3.7. Определение циклической деформации в зоне концентрации напряжений	63
3.8. Расчет долговечности элементов конструкций на стадии инициирования трещины усталости	67
Глава 4. Распространение трещины усталости	70
4.1. Критерии предельного состояния конструкции	70

4.2. Скорость роста трещины усталости	74
4.3. Коэффициент интенсивности напряжений	77
4.4. Методы определения коэффициента интенсивности напряжений	80
4.5. Фигур трещины фронта трещины	83
4.6. Влияние пластических деформаций	84
4.7. Векторы, влияющие на распространение трещины усталости	87
4.8. Оценка долговечности деталей конструкции на стадии распространения трещины	95
Глава 5. Методы определения параметров, характеризующих сопротивление материалов распространению трещины	98
5.1. Определение параметров, характеризующих сопротивление материалов росту трещины усталости	98
5.2. Определение критического значения коэффициента интенсивности напряжений	101
5.3. Интеграл Райса - Корделана	109
Литература	116