

В.А.ВИКОВ, В.О.САДОВИЧ, С.Е.МАКЕНКО

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ. КИНЕТИКА ТРИММ,
КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ. РАЧЕТ ПРОЧНОСТИ

Таблицы во вложении

У 4638/84



В настоящем пособии рассмотрены вопросы усталости, соответствия напряжениям в распределенных трещинах, а также природы и механизмов коррозийной усталости в зависимости от характера и свойств материала. Представлено влияние концентрации напряжений, масштабного фактора, состояния поверхности, частоты и асимметричности нагружения. Приведены методики расчета переменных напряженных деталей при статическом и нестационарном нагружении.

Пособие предназначено для студентов Ленинградского инженерно-технического института, специализирующихся по прочности корабля в судостроительном факультете высшего класса/факультета производств.

ИВАН

Владимир Иванович

САХУРН

Владимир Савицкий

МАКЕВИЧ

Сергей Иванович

ЦЕЛЮСНАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ. КРИТИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНА.
КОРРОЗИОННАЯ УСТАЛОСТЬ. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ

Третье издание

© Изд. 1964

Стр. редактор К. Е. Николаев
Диз. редактор А. П. Чернышова

Тех. ИИР, Изд. 7-145, Тираж 300. Изд. 4. Изд.-маш. к. А. П.
4-32518. 8/7-1975 г. Книга IV изд.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы вышло много исследований критической усталостной разгрузки материалов, верооятно-усталостной прочности и механизмов повреждения при нестационарных циклических нагружениях. Эти данные имеют большое значение для принятия решений в современных конструкциях прочности, при конструировании, в расчетах. Однако результаты этих исследований опубликованы в многочисленных статьях и монографиях отечественных и зарубежных ученых и известны лишь узкому кругу специалистов. Эти обстоятельства побуждали авторов выделить эти вопросы в курс лекций для студентов, специализирующихся в области прочности судовых конструкций, в судостроительном факультете высшего класса/факультета производств. Содержание этих лекций и представлено в настоящем пособии, которое дополняется ранее изданным издательством ИИР пособием II и III по механическим свойствам металлов.

Главы I и II составлены в.т.н. С.И. Макашечем, глава III - в.т.н. Н.С. Золотораевым, а главы IV - в.т.н. проф. Л.А. Макашечем. Подробные ссылки на работы исследователей, фамилии которых упомянуты в пособии, можно найти в рекомендуемой литературе.

Глава I

КРИТИКА ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИ УСТАЛОСТИ

§ 1. Основные закономерности и распространения трещины усталости

Характерной чертой усталостного разрушения является отсутствие заметной остаточной деформации в зоне разрушения даже у таких металлов, которые обладают высокой пластичностью при статическом разрушении. Так же малая протяженность трещины усталости является характерной особенностью трещины усталости, которые не могут быть обнаружены кондукционными методами, так как протяженность микротрещины в микроскопическом металле, сопоставима с размерами кристаллитов зерна.

Под действием переменных или циклически нагруженных микроскопическим металлом происходит многократную пластическую деформацию, в результате которой накапливаются. Первичные трещины образования микротрещины могут быть обнаружены под микроскопом. Это — линии и плоские образования (плоские образования отдельных микроскопических металлов друг относительно друга по кристаллографическим направлениям), а также следы двойных линий зерна. В дальнейшем в процессе циклического нагружения в местах пересечения плоских образований друг с другом, а также с двойными линиями и границами зерна, возникают микротрещины усталости. Рост и развитие отдельных микротрещины приводит к образованию макротрещины, а их распространение и разрушение изделия. При этом скорость и характер усталостного разрушения, как металлического процесса, могут существенно зависеть от физико-химического воздействия окружающей среды.

Микроскопические исследования структуры показывают, что

макротрещины складываются из отрывов отдельных стадий действия переменного нагружения, составляющей 5-10% от общего числа циклов до разрушения, а наиболее благоприятные условия для образования пластических микродоформаций, а также и образования микротрещины, складываются на поверхности изделий, особенно в районах концентрации напряжений. Таким образом усталостное микроразрушение начинается всегда до "малого" микроскопического разделения тела. Следовательно усталость — это постепенный процесс, развивающийся во времени, а не мгновенный структурообразующий этап, характерный для пластической деформации.

Процесс усталостного разрушения можно разделить на стадии "зарождения" и стадии "распространения" трещины. Начало микротрещи обычно совпадает с появлением трещины длиной 0,001-1,00 мм, т.е. трещины такой длины, при которой она обнаруживается современными методами дефектоскопии (магнитная, ультразвуковая, авторных токов, при наличии индикаторов и т.д.). Также разделение во времени является усталости и объясняется, в первую очередь, практической сложностью обнаружения трещины.

В этом случае общая длительность M от начала нагружения и до полного разрушения изделия определяется числом циклов, необходимых для зарождения M_1^* и распространения M_2^* трещины:

$$M = M_1^* + M_2^* \quad (1)$$

Степенью развития продолжительности каждой из этих стадий (M_1^*/M и M_2^*/M) зависит от многих факторов, но в первую очередь от степени однородности напряженного состояния.

Для однородных и слабо неоднородных напряженных состояний (расплавные, расплавленные-статные, изгиб или сжатие гладких образцов или деталей) относительная продолжительность стадии распространения M_2^*/M обычно лежит в пределах 0,1-0,5 (конкретное значение для структуры неоднородные металлы, например, чугуны. Для них $M_2^*/M = 0,7-0,9$). В этих условиях (при однородном напряженном состоянии) происходит достаточно равномерное во всем объеме детали усталостное образование микротрещины. Следствием этого является образование на стадии зарождения многочисленных микротрещины. А стадии распространения представляет собой фактически процесс сли-

ние этих напряжений в макротрещину напряжений. Темы роста трещин на этой стадии зависят от структуры изделий, после обнаружения трещин в результате контрольных осмотров, критие осмотра. Однако мы не будем рассматривать этот случай, так как напряжения усталостной прочности для условий однородного напряженного состояния в настоящее время разработаны достаточно хорошо, что позволяет при отсутствии трещин в технологически смысле практически считать возможность появления усталостных трещин в диапазоне размеров работоспособности изделий на стадии распространения трещин путем изучения и напряжения их скорости роста, при всей сложности этой проблемы, не дает существенной информации, так как объем длительности изделий в условиях однородного напряженного состояния почти целиком определяется продолжительностью стадии зарождения. В этом отношении большой практический интерес представляет вопрос, связанный со скоростью роста усталостных трещин в условиях неоднородного напряженного состояния.

На практике многие детали имеют в конструкции некое сложную форму и усталостные трещины в первую очередь начинают развиваться на участках, характеризующихся неоднородностью напряженного состояния, т. е. в высоконапряженных зонах концентраторов. В первую очередь такими являются дырчатые отверстия, вырезы, места перемены профиля, дефекты сварки и т. д. По экспериментальным данным в условиях неоднородного напряженного состояния относительная продолжительность стадии распространения $\frac{M}{M_0}$ составляет 0,3-0,5 и, как правило, тем больше, чем выше уровень номинального напряжения в области концентратора напряжений. В этих условиях высокие местные переменные напряжения способствуют образованию быстрого количества одной или нескольких трещин. Их зарождение может быть связано и с максимальной усталостью. Но в этом случае после зарождения трещины быстро переходят на высоконапряженной зоне концентратора и распространяются не происходит в объеме материала неоднородного или локализованного напряженного предельно высокой деформацией. Сам же трещина, как концентратор напряжений, не имеет особой сложности в процессе циклического нагружения материала впереди ее фронта, но исключенный район, непосредственно прилегающий к фронту трещины. На основании рассмотренного выше

состояния можно предположить наличие напряжений впереди трещины, в ее окрестности связано с эффектом локализованной трещины. Поэтому в условиях неоднородного напряженного состояния объем длительности до полного разрушения во многом определяется длительностью стадии распространения трещины. В этих условиях наличие высокой усталостной трещины далеко не всегда служит признаком "отказа" изделий, часто она еще долго сохраняет свои работоспособности и с трещиной. Кроме того, иногда зарождаются трещины полностью останавливаются в развитии. Такие трещины имеют название нераспространяющихся трещин усталости. Однако на пути использования этих резервов работоспособности изделий возникают значительные трудности, которые в первую очередь связаны с отсутствием достаточно надежных методов расчета таких распространяющихся трещин усталости. Кроме того, усталостная трещина создает угрозу крупного разрушения изделий. Поэтому эксплуатация изделий с трещиной обычно не допускается. Тем не менее наличие высоконапряженной распространяющейся усталостной трещины необходимо исключать, так как возникает угроза и общественной безопасности изделий и работоспособности конструкций в деталях, работающих в условиях воздействия переменных нагрузок.

§ 2. Особенности распространения трещин усталости

Для трещин усталости характерно распространение их в направлении изделий. Например, при знакопеременном изгибе осей трещины распространяются по изогнутому сегменту (рис. 1, а) при знакопеременном кручении вылез - по косому сегменту под углом 45° к образующей (рис. 1, б).

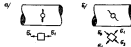


Рис. 1. Схема распространения трещин усталости: а) - при знакопеременном изгибе; б) при кручении

Характерной чертой распространения трещин усталости является скорость их роста $\frac{dL}{dN}$, где N - число циклов, L - геометрический параметр трещины (длина, глубина, ширина трещины).

Во рост трещин имеет сложоброный характер. От момента зарождения трещины и до разрушения металла, кратковременные периоды медленного развития, включая даже остановки, сменяются кратковременными периодами быстрого ускорения. Если нет особых предостережений о причинах этого явления и разрабатываемый материал лишь предположить, что средняя скорость роста трещины определяется не только скоростью ее распространения в соответствии с эмпирическим законом усталостного разрушения, но и способностью материала в течение критического разрушения в периоды кратковременных ускорений.

Другой особенностью распространения трещин усталости является ее нелинейность в процессе роста и кинематический характер. До последнего времени это явление описывали только с использованием роста трещины в аморфном материале. Так, считалось, что в металлах с высоким сопротивлением сдвигу трещина преимущественно растет вдоль границ зерен и по границам двойников; в металлах с низким сопротивлением сдвигу трещина преимущественно растет по кристаллографическим плоскостям дислокационно ориентированных зерен и вызывает их разрывание в других, неблагоприятно ориентированных зернах.

Следует также отметить исследования, позволяющие, что одной из основных причин кинематического роста и ее нелинейности могут быть остаточные сжимающие напряжения в вершине трещины, возникающие на участках разрывания.

§ 3. Неклассическое распространение трещин усталости

В некоторых случаях зарождаются усталостные трещины не распространяются. Это явление наблюдается, например, при образовании острого надрыва. Длина подобного рода трещины зависит от остроты надрыва и уровня переменных напряжений и по экспериментальным данным не превышает 0,1-0,5 мм.

Существенные неклассические трещины описываются с теорией неклассического фактора Пейфера и трещин B модели Патерсона, которые во многом сходны. Во время их усталост-

ного разрушения определяется средними значениями напряжений в некотором объеме, размеры которого являются постоянной материала. По Патерсону же усталостное разрушение определяется значением максимальных напряжений на некотором расстоянии B от вершины надрыва или фронта трещины, где B так же постоянна, как и постоянна материала. Наличие напряжений рассматривается в предположении упругости материала и, если выдвигать этот предположение даже критической, то предполагается, что усталостное разрушение не будет равномерным. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, между такими условиями складываются в металлах в присутствии острого надрыва и при достаточном уровне трещин переменных напряжений. На рис. 2 представлена диаграмма усталостного разрушения образца, содержащего надрыв.

Эта диаграмма является результатом обработки экспериментальных данных, полученных при испытаниях по стандартному типу на испытательных машинах и на различных-сложных образцах на растяжение и сжатие. Здесь линия BC соответствует пределу выносливости, определенному по разрушенным образцам; T - предел выносли-

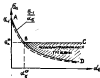


Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения образца с надрывом:

σ_C^0 - теоретический коэффициент концентрации напряжений;
 σ_B^0 - амплитуда переменных напряжений; N_B^0 - предел выносливости гладких образцов

ности, определенными по образцам трещин. Величина максимальных напряжений σ_B^0 , необходимая для зарождения трещины, приблизительно равна пределу выносливости гладких образцов:

$$\sigma_B^0 = \sigma_C^0 = \sigma_{\text{вын}}$$

Как видно из диаграммы, при $\sigma_B^0 < \sigma_C^0$ и $N_B^0 > N_C^0$ трещина, зарождающаяся в вершине острого надрыва (где максимальные напряжения в некотором объеме материала всегда превышают трещины или критического значения) не имеет роста, в отличие

высоким градиентом напряжений в районе острого изгиба, возникает в том, где истинно напряжений ниже критического значения и останавливаются в развитии.

Трещина является чрезвычайно острым концентратором напряжений, но если ее размеры малы, эти напряжения локализуются в ее острие малом объеме и не оказывают существенного влияния на величину критических напряжений в основном объеме материала. Если же размеры трещины достаточно велики ($l \gg 0,5 \text{ мм}$) или величина амплитуды переменных напряжений $\sigma_{\text{амп}}$ больше $\sigma_{\text{крит}}^*$, то для полного торможения трещины необходимо создать уровень действующих напряжений. Но данная трещина эта критическая в отношении напряжений, при которых трещина не распространяется, поэтому ее длина трещины в процессе измерения, и в случае заданного расстояния-света при условии, что длина трещины l мала по сравнению с шириной образца b ($l/b < 1$), остается

$$\sigma_{\text{амп}} = \sqrt{l \sigma}.$$

где $\sigma_{\text{амп}}$ — амплитуда переменных напряжений, при которых трещина не распространяется;

l — суммарная длина трещины в образце;
 b — истинная ширина.

На практике критический подвиг не распространяющаяся трещина усталости может иметь определенную величину изданий в процессе роста трещины, если это приводит к возникновению уровня действующих переменных напряжений. Известно, например, что в судовой конструкции, связанная реакторным оборудованием работающим механизмом, иногда возникает такой случай. Это связано также с тем, что после прекращения трещины по мере их роста величина конструкций увеличивается, образцы получают в месте с тем увеличивается уровень переменных напряжений и прекращается рост трещины.

Следует отметить, что подобный эффект часто наблюдается при лабораторных испытаниях образцов на машинах с жестким силовым режимом возбуждения переменных напряжений. На испытательных машинах часто так происходит напряжении в образце амплитуда подвигшейся величина амплитуды ограниченного переизменения.

Подвижение не распространяющихся трещин усталости может быть связано и с действием связанных остаточных напряжений

в поверхностных слоях изделий с увеличенной концентрацией

$\sigma_0 < \sigma_{\text{крит}}^*$ или даже без концентраторов напряжений. Эти напряжения могут, например, вводиться в результате широкого распространения на практике метода поверхностного упрочнения изделий облучением резкими, парами или обдувкой дробью. Причем, в этом случае, связывая остаточные напряжения достигают максимального значения в подповерхностных слоях, что исключает и здесь использовать понятие не распространяющаяся трещина с теорией Нейбера или Петерсона. Действительно, если трещина распространяется в слой изделия от дна надреза (в изделиях с концентратором напряжений) или от поверхности изделия (в изделиях без концентратора напряжений), то на некоторой глубине истинные напряжения (рабочие могут соответствовать) могут оказаться в необходимом для развития трещины объеме материала между критическим, так как величина остаточных напряжений уменьшается с глубиной, и трещина распространяться не будет.

§ 4. Скорость распространения трещины усталости

Анализ условий, при которых происходит возникновение не распространяющихся трещин усталости, позволяет доказать, что деформационные состояния в окрестности фронта развивающейся трещины являются решающим фактором на ее скорость роста. Однако строгий математический анализ напряженно-деформационного состояния во фронте трещины затруднительно. Поэтому продолжим анализировать в полуэмпирической теории распространения усталостных трещин, основываясь на широко принятой критерии напряженно-деформационного состояния. В качестве такой критерии обычно применяют: величина переменных напряжений, коэффициент интенсивности напряжений Крива К, величина энергии, накопленной в слое трещины, или размер пластической зоны в толщине трещины.

Отсутствие фундаментальной информации в данной области не исключает в настоящее время сделать решающий выбор в пользу одного-либо из вышеперечисленных критериев. Так же можно критерии, основанные на учете пластичности, например предпочтительней, так как она лучше представляет физический процесс

наблюдения установившегося напряжения, во многом обусловленные повторной пластической деформацией.

Предполагая квазиравновесные законы распространения установившейся трещины в состоянии отрыва и случаи циклического нагружения бесконечно малыми равномерными напряжениями, параллельными и перпендикулярными к трещине и могут быть записаны в единой форме:

$$\frac{dL}{dt} = f(\ell, \sigma_n, A_1),$$

где σ_n - амплитуда переменных напряжений;

ℓ - длина трещины;

A_1 - постоянная материала, иногда зависящая от величины средней напряженности.

Если представить некоторые частые встречающиеся законы распространения трещины установившегося

$$1. \quad \frac{dL}{dt} = \frac{A_1}{(A_2 - \sigma_n) \omega \sqrt{\pi}} \cdot \sigma_n \cdot \ell^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ланг})$$

$$2. \quad \frac{dL}{dt} = A_1 \cdot \sigma_n^2 \cdot \ell \quad \left(\begin{array}{l} \text{Фрост} \\ \text{Дейбрик} \end{array} \right)$$

$$3. \quad \frac{dL}{dt} = A_1 \cdot \sigma_n^2 \cdot \ell \cdot f(\sigma_{max}) \quad (\text{Ланг})$$

$$4. \quad \frac{dL}{dt} = A_2 (\sigma_n - \sigma_{th})^m \quad (\text{Фейбурн})$$

$$5. \quad \frac{dL}{dt} = f(\sigma_n \cdot \sigma_{max}) \quad \left(\begin{array}{l} \text{Вангеринг} \\ \text{Вайт} \end{array} \right)$$

$$6. \quad \frac{dL}{dt} = f(K) \quad (\text{Паркс})$$

Здесь ω - радиус эллиптической дыры;

σ_{max} - максимальное напряжение цикла;

σ_{th} - амплитуда напряжений, зависящая от скорости отрыва отрывающего:

σ_n - амплитуда переменных напряжений σ_{max} ;

K - коэффициент интенсивности напряжений;

ω - коэффициент концентрации напряжений во фронт трещины.

Законы Ланга, Ланг-Фейбурна, Фроста и Дейбрика описывают распространение трещины установившегося состояния циклического нагружения равномерными напряжениями. Законом Вангеринга описывается рост трещины бесконечно малой амплитуды переменной нагрузки в случае, когда среднее напряжение равно нулю, а амплитуда переменных напряжений не зависит от длины трещины. Законом Вайта описывается рост трещины установившегося состояния в случае переменной нагрузки на равномерность.

Законы Паркса, Вангеринга и Вайта предполагают справедливость для всех видов деформации при любой конфигурации дырок. Однако в настоящее время это, в большой мере неутвержденное предположение авторов, не является достоянием экспериментального подтверждения.

§ 5. Законы сдвигающего режима возбуждения переменных напряжений на распространение трещины установившегося

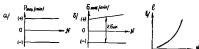
На практике наиболее часто реализуется режим сдвигающего режима переменных напряжений. Режимы сдвигающего режима, при которых сохраняется постоянная амплитуда переменных (например, профилей или углов скорости сдвигаемого сегмента шпанделя). Режимы сдвигающего режима, при которых сохраняется постоянная величина максимальной нагрузки.

Переменная трещина установившегося состояния имеет зависимость от вида сдвигающего режима, но вид режима существенно влияет на процесс распространения трещины. При сдвигающем режиме роста трещины, при прочих равных условиях, увеличивается больше, чем при растягивающем. Размеры трещины в момент прекращения нагрузки, обычно меньше, но сравнимы с размерами дырки в квазистационарной стадии сдвигающего режима сдвигающего режима. При сдвигающем режиме наблюдается обратная зависимость.

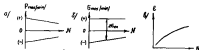
Как и квазистационарный режим отрыва (I), сдвигающий (II) режим в режиме сдвигающего режима амплитудой переменной нагрузки определяется в квазистационарной стадии (II) на величину максимальной нагрузки (таб. 2, А), максимальной (параллельной) дырки

(см. рис. 3, d) в виде распространяемой волны (см. рис. 3, b) по мере ее роста. Последней из упомянутых режимов чаще всего пользуются при лабораторных исследованиях влияния угловых деформаций.

I. Мягкий режим



II. Жесткий режим



III. Режим с постоянной амплитудой напряжений

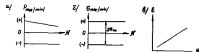


Рис. 3. Влияние угла деформации на распространение трещины усталости

Анализируя эти данные с помощью диаграмм переменного напряжения показываем, что при распространении усталостной трещины происходит в основном ее увеличение растяжением, тем же мере скорость роста усталостной трещины падает в прямой зависимости от амплитуды максимальных напряжений σ_{max} , кото-

ройной по величине от нуля. Так, например, в соответствии с рис. 3, d, скорость роста трещины увеличивается с увеличением σ_{max} при постоянной величине максимальных деформаций цикла ϵ_{max} . Увеличение трещины приращением цикла

$$\Delta n = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \text{при } \sigma_{min} = \text{const} \text{ тогда, как при}$$

до, вызывает снижение скорости роста трещины. В частности, по данным Фроста, составляем для угла деформации $\epsilon_{max} = 0,01$, $\epsilon_{min} = 0$, $\sigma_{min} = 0$, $\sigma_{max} = 100$ МПа, $\sigma_{min} = 0$, $\sigma_{max} = 100$ МПа, $\sigma_{min} = 0$, $\sigma_{max} = 100$ МПа.

§ 6. Распространение трещин усталости в условиях статического нагружения

Вместо конструкций в Детали чаще работают в условиях статического нагружения. В этом случае их общая долговечность до разрушения обычно оценивается с помощью гипотезы линейного накопления повреждений на основании результатов лабораторного испытания образца при статическом нагружении. Так, например, если изделие подвергается действию переменных нагрузок при симметричном цикле нагружения и амплитуда напряжений цикла по времени изменяется, критический цикл $N_{11}, N_{12}, N_{13}, \dots, N_{1n}$, действующий в течение цикла $N_{11}, N_{12}, N_{13}, \dots, N_{1n}$, соответственно: $N_1 < N_1', N_2 < N_2', \dots, N_n < N_n'$, где N_1', N_2', \dots, N_n' — число циклов до разрушения изделия при $\sigma_{11} = \text{const}$, то по линейной гипотезе накопления усталостные повреждения

$$D = \frac{N_1}{N_1'} + \frac{N_2}{N_2'} + \dots + \frac{N_n}{N_n'} = \frac{1}{N_1'} \sum_{i=1}^n N_i$$

в разрушении от усталости наступит при $D = 1$. Между тем известно, что подобный оценки повреждений имеют арбитражный характер и расчетная величина долговечности может значительно отличаться от действительной. Экспериментальные исследования показывают, что статическое растяжение связано не только с увеличением времени порогов и нагружений на предельную нагрузку, но и с их влиянием на скорость роста усталостной трещины на стадии распространения.

Если в настоящее время трещина имеет длину l или предельную, чтобы сделать какой-либо обзорный вывод, то

основные моменты, что рассмотренное явление связано со скоростью перемещения материала вперед растущей трещины.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что скорость роста трещины увеличивается после предварительной перегрузки и уменьшается после предварительных разгрузок. Известно также, что эффект становится менее заметным, когда снижаются уровни напряжений материала и разница между ними уменьшается.

С другой стороны в технической литературе есть данные о том, что скорость роста трещины во многом зависит от разницы уровней концентрации, используемых при одностороннем уровне напряжений, увеличивается с увеличением теоретического коэффициента концентрации, т.е. с увеличением продолжительности стадии зарождения.

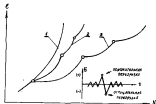


Рис.4. Влияние предварительных перегрузок на скорость роста усталостной трещины (v - длина трещины, ΔK^2 - число циклов): 1 - испытание без перегрузки и с отрицательной перегрузкой; 2 - испытание с положительной и отрицательной перегрузками; 3 - испытание с положительной перегрузкой

Таким образом, скорость роста трещины, в зависимости от стадии зарождения материала вперед растущей трещины увеличивается с понижением уровня предварительного циклического нагружения

и с увеличением продолжительности его действия ²⁾.

Однако следует иметь в виду, что предварительные перегрузки могут увеличивать сопротивление усталости. Работа по-прежнему лет показывает, что это, вероятно, имеет место только в присутствии достаточно развитой трещины и связано со значительным увеличением ее скорости роста непосредственно после действия перегрузки (рис.4) и разгрузке вследствие сдвигающих остаточных напряжений и ее головки.

Тем выше уровень перегрузки, тем больше величина остаточных напряжений, которые увеличивают величину растущей трещины и в итоге и приводят к снижению скорости роста. В зависимости скорости роста трещины, как видно на рис.4, восстанавливается, но в конечном счете скорость увеличивается до разгрузки.

§ 7. Скорости роста трещины усталости в связи со статическими механическими свойствами материала и геометрическими размерами образца

В табл.1 представлены статистические скорости распространения трещины усталости и статические механические свойства для некоторых материалов на разных фронтах. Скорость роста на каждой стадии принята за единицу. Из приведенных данных видно, что для одного и того же материала можно говорить только о слабой зависимости между уровнем продольной усталости и скоростью роста трещины. В материалах с высоким уровнем продольной усталости (например, в стали) скорость роста трещины выше, чем в материалах с низким уровнем (например, в титане и алюминии). Это отчасти объясняется наличием большой потенциальной энергии деформации алюминидных материалов.

Показано, что статистический эффект также связан с величиной максимальной энергии упругой деформации, которая больше у крупных образцов, вследствие чего у них быстрее происходит

2) Влияние уровня предварительного циклического нагружения (перегрузки и разгрузки), имеет даже уменьшение усталостности материала в результате его упрочнения и деформационного старения.

Материал	$\sigma_{\text{ср}} \cdot 10^2$ кгс/мм ²	$\sigma_{\text{ср}} / \text{мм}^2$	$\sigma_{\text{ср}} / \text{мм}^2$	$F = \sigma_{\text{ср}}^2$ кгс/мм ²	$\sigma_{\text{ср}}^2$ %	Статистические параметры	
						$\sigma_{\text{ср}} - \text{мм}^2$	мм
Чугун серый (сечископана)	30,8	31,6	21,6	2,20	30,5	1	I
Аустенитная сталь	50,0	50,0	24,4	2,14	56,3	0,7-1,3	1,8-3,2
Дисперсионные легированные стали	70,6	66,6	8,20	4,0	1,4-2,6	31-68	
Титановые чистый и легированный	11,5	8,6	0,70	14,5	13-24	0,4-1,3	
Сплав алюминия с 4,5% меди	49,5	45,0	0,73	9,5	18-190	90-1200	
Сплав алюминия с 5,5% меди	56,0	50,5	0,71	15,0	130-300	1300-2000	
Титановые чистый и легированный	56,0	30,6	1,01	1,03	-	10	20
Сплав титана с 4,75% алюминия	83,0	52,1	1,03	1,01	-	100	500-150
Сплав титана с 15,0% алюминия	117,0	52,0	1,01	1,01	-	20-25	0,005
Вольфрамистый	22,0	2,7	1,15	62,0	4,3	4,3	5,9
Вольфрамистый легированный	31,4	22,6	1,15	11,0	4,5	4,5	1,8
Дань	22,6	3,4	0,84	65,8	100		

2) δ - статистическое отклонение элементов; $\sigma_{\text{ср}}$ - средний предел текучести; $\sigma_{\text{ср}}^2$ - средний предел текучести; $\sigma_{\text{ср}}^2$ - процентное отклонение; F - величина продольной упругости.

рост устойчивости трещин и разрыв наступает устойчивой фазой. Если статистический фактор отклонения незначительной. На геометрисески подобной образцы указанные значения действительны как в условиях чистого металла (рис. 5), так и при сплавлении растекания-сплава. Указанные значения являются как только на образцы так же проводят к изменению скорости роста устойчивости трещин. В то же время даны образцы по данным Вайсманн В.К. не зависят от скорости роста.

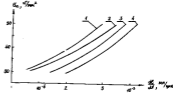


Рис. 5. Величина геометрисески размеров трещины образцы на статистическом уровне на скорости роста трещины устойчивости при статистическом уровне чистого металла:
1 - $L = 6$ мм, $dL/dt = 0,026$ мм/сут, 2 - $L = 10$ мм, $dL/dt = 0,045$ мм/сут, 3 - $L = 15$ мм, $dL/dt = 0,074$ мм/сут.

5. Величина температуры окружающей среды и частота циклов на скорости роста трещины устойчивости

Кроме известно, что величина температуры на величину устойчивости трещины параметра в среднем образцы устойчивости трещины или устойчивости (длина трещины). С изменением температуры трещины стабилизируются в область низких значений устойчивости. Эти значения являются устойчивыми, что скорость роста трещины является устойчивой с изменением температуры устойчивости. Незначительные колебания температуры трещины устойчивости трещины стабилизируются на уровне с изменением скорости трещины устойчивости трещины. Например, по экспериментальным данным 10-

нагрузки на мягкой стали скорость роста увеличивается в 2-3 раза с повышением температуры от -40°C до $+0,5^{\circ}\text{C}$. Также же увеличивается скорость роста выщелачивания на алюминированной стали Ральфа и Малона при изменении температуры от $+20^{\circ}\text{C}$ до $+250^{\circ}\text{C}$. Известно также, что с изменением амплитуды переменной напряженной нагрузки температурного фактора увеличивается.

Однако есть и исключения. Так в случае и его аналогичная скорость роста трещины усталости увеличивается с увеличением температуры.

Важнейшими экспериментальными результатами являются, что скорость роста трещины усталости увеличивается с увеличением частоты нагружения (известно частота нагружения в сотни раз соответствует изменению скорости в несколько раз) и с повышением уровня деформации напряжений (известно частота становится сильнее).

Если основными считать, что увеличение скорости роста трещины с увеличением частоты нагружения связано с увеличением времени выдержки при высокой напряженности и увеличением скорости роста напряжений в цикле. Великие скорости нагружения в форме цикла несущественны.

Следует существовать три основных фактора, которые способствуют увеличению скорости роста с увеличением частоты. Во-первых, скорость роста связана с величиной пластической деформации в процессе каждого цикла изменения нагрузки (при высокой частоте имеет большее количество времени для выдержки пластической деформации). Во-вторых, следует сказать, что величина атмосферной коррозии будет зависеть от частоты циклов при высокой частоте нагружения. Наконец, изменение температуры материала с изменением частоты нагрузки имеет также влияние на скорость роста трещины.

Г л а в а II КОРРОЗИОННАЯ УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ

§ 3. Адсорбционная и коррозионная усталость. Характеристики коррозионной усталости

Детали машин и элементы конструкций часто эксплуатируются в окружающей среде — атмосфере воздуха, в воде и морской среде, в атмосфере влажного воздуха и др. Усталостные среды могут оказывать влияние на металловую структуру металлов и сплавов, особенно при длительном нагружении.

И.А.Рейсндером установлено, что коррозионно-усталостные среды — атмосфера воздуха, водные металлы и др. оказывают сопротивление деформации и разрушению твердых тел в среде с адсорбционной коррозионно-усталостными элементами среды (адсорбционный эффект Рейсндера).

Коррозионно-усталостные среды могут оказывать сопротивление металлам при циклическом нагружении. Так, например, при испытании в среде атмосферного воздуха предел выносливости конструктивных сталей может снижаться на 10-20%, по сравнению с пределом выносливости на воздухе (рис. 6). Великие усталостные металлы, происходящие в коррозионно-усталостных средах, являются адсорбционной усталостью.

Особую опасность для усталостной прочности представляют коррозионно-усталостные металловыми материалами являются водородные коррозионные среды. Впервые исследованными коррозионной усталости стали FeS в Англии в 1917 г.

В нашей стране систематические исследования коррозионной усталости металлов начали выполняться в конце 40-х и в начале 50-х годов. В последующие годы периода исследований работы И.А.Рейсндера, Л.А.Павлова, Г.В.Корсакова и др.

При длительном циклическом нагружении в коррозионной сре-

де у большинства конструктивных металлов в отличие от обычных сталей наблюдается повышение вязкости, по сравнению с вязкостью в воздушной среде. Кривая коррозионной усталости, как правило, не имеет горизонтального участка и следовательно вязкость даже при больших числах циклов (рис. 7).

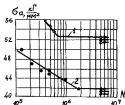


Рис. 6. Кривые усталости стали 40 в воздухе (1) и в 3%-ном растворе NaCl (2)

Основная причина сокращения ресурса коррозионной усталости является ускоренный процесс коррозионной вязкости, на который приходится наибольшее напряжение, но выходящее за пределы от усталости до вязкого (пластического) течения металла при ускоренном действии коррозионной среды и повышенных напряжениях. Каждый цикл цикла нагружения обычно принимается равным $(10 \cdot 60) \times 10^3$.

Коррозионная среда сильно снижает прочность большинства конструктивных металлов и сплавов. Так, Г.Б. Карповича наблюдали снижение в 21 раз усталостной прочности коррозионной вязкости в сероводородной воде, выходящей из скважины стальной скважины 45, по сравнению с пределом вязкости в воздухе.

Следует отметить принципиальную разницу поведения в коррозионной среде и повышенных напряжениях. Предварительно коррозии металлы существенно снижают вязкость при последующем нагружении в воздухе. Однако

кривая усталости в этом случае имеет горизонтальный участок. При одновременном действии коррозионной среды и повышенных напряжений коррозионная среда сильнее снижает вязкость и кривая усталости не обнаруживает горизонтального участка.

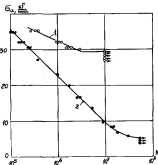


Рис. 7. Кривые усталости стали 20 в воздухе (1) и в 3%-ном растворе NaCl (2)

Характерная особенность коррозионно-усталостного разрушения металлов, действующих против коррозии - это повышение в зоне одновременного действия большого числа трещин и, как следствие, многократный скачок. Причиной этого является более длительность периода до образования коррозионно-усталостных трещин, по сравнению с периодом их развития. Если одна из зародившихся трещин достигает опасной для прочности области размеров и приводит к поломке, другие трещины успевают значительно вырасти.

Г.А.Павлова систематизировала большое количество экспери-

металлические детали из коррозионной устойчивости углеродистой, низко- и среднеуглеродистых сталей. Согласно этим данным, в зависимости от химического состава и термической обработки у тех сталей, у которых предел выносливости в воздухе увеличивается от 15 до 35 кгс/мм², увеличение предела коррозионной выносливости на базе $(10+50) \times 10^6$ циклов в пресной воде равно 10-15 кгс/мм², а в морской или морской воде 4-10 кгс/мм². При этом величина указанного предела коррозионной выносливости для всей группы сталей приблизительно на величину от величины предела выносливости на воздухе (рис.8).

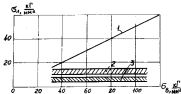


Рис.8. Зависимость предела выносливости и относительного предела коррозионной выносливости от относительного сопротивления для различных сред: 1 — воздух; 2 — пресная вода; 3 — морская вода

Коробки редуцированного давления Г.В.Королева при испытаниях сталей марок 30Х, 40Х, 45 и ХН15 в различных структурных состояниях.

Эти данные показывают, что относительное сопротивление в среде для выносливости в воздухе не могут быть критериями коррозионно-устойчивости конструктивных сталей. Обычно сложной задачей является прочность и выносливость сталей общей термической обработки и химического состава приблизительно не приводит к изменению ее коррозионно-устойчивости прочности. Поэтому эффективнее применять легированные и термически обработанные стали для ответственных деталей в конструкциях, эксплуатируемых при окислительном действии переменно-

ной окружающей и коррозионной среды, возможно только в условиях эффективной защиты стали от ее структурного металла.

Процесс аноднокатодной коррозии металлов зависит от природы электролита и происходит по разному в кислых, нейтральных и щелочных средах. Поскольку в нейтральных средах (водные растворы солей, пресная и морская вода) декарбонизация металла происходит, в основном, за счет кислорода, растворенного в воде, то агрессивность среды во многом обусловлена концентрацией кислорода и его доступностью к металлу. Однако высокая концентрация кислорода в среде может привести к замедлению коррозионного процесса в связи с увеличением стойкости защитных пленок.

Раствор кислорода в воде увеличенной концентрации повышает интенсивность коррозионного процесса вследствие повышенной электропроводности раствора и действия окислительного иона O_2 , увеличенного катодного свойства пленок. Но при повышенной концентрации увеличивается растворимость кислорода, что может привести к снижению скорости коррозии. Как видно из рис.9, с увеличением концентрации NO_2 NO увеличивается относительный предел коррозионной выносливости. Это происходит, отчасти из-за того, что при малых концентрациях, постепенно увеличивается и достигает максимума при концентрации около 3%, после чего падает до нуля при концентрации около 20%.

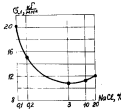


Рис.9. Зависимость относительного предела коррозионной выносливости стали 45 от концентрации раствора NO_2

В.А.Тихонов и Л.А.Сухору исследовали коррозионно-устойчивость прочности сталей марок 16 в различных средах: в воздухе, водопроводной воде, синтетической черной воде и соляной воде и в 3%-м растворе NO_2 . Результаты показывают, что во всех указанных сред

наиболее агрессивными по отношению к металлу являются водные растворы. Установлено, что скорость роста стали в 30-й раз выше в 10% CaCl_2 . Взаимодействие стали в 30-м растворе CaCl_2 сменяется фазой с замедленности в насыщенном растворе. В связи с этим следует принять, оправданная при исследовании коррозионной устойчивости углеродистой и легированной стали применялись 30-го раствора CaCl_2 в качестве агрессивной среды, имитирующей морскую воду.

При анализе коррозионной устойчивости оставлены для сравнения принято считать долговечность в среде насыщенности образцов, изготовленных из насыщенности в воздухе. Однако исследователи Тейлор и Соколов, Уолдсворте, П.С.Вановой и другие считают, что воздух не является агрессивной средой. В зависимости от уровня влажности, влажности воздуха и содержания в нем агентов, интенсифицирующих коррозионные процессы, долговечность металла в процессе при переходе от атмосферного давления в вакуум может изменяться в десятки раз.

Следовательно, на практике приходится иметь дело не с "чистой" устойчивостью в агрессивной среде, а, главным образом, с коррозионной устойчивостью. Обычно металлы на устойчивость проверяются на воздухе, анализом воздействия на коррозионную устойчивость в различных воздействиях агрессивной среды малой активности.

Важные различия сред по скорости роста устойчивости трещин не одинаковы. Во многих исследованиях особенно отмечаются роль кислорода в металле, или преимущественно агрессивной среды, способствующей увеличению скорости роста трещины.

Фронт исследованная различные среды по скорости роста трещины в металле стали на разных уровнях переменных напряжений $\sigma_n = (0,25-0,35) \sigma_s$, в трещине в вакууме, что существенно в агрессивной среде увеличивает скорость роста трещины (по сравнению с атмосферным воздухом) за счет вытеснения из кислорода. В это время скорость роста трещины была одинаковой на образцах образцов (без доступа воздуха) и на образцах в присутствии воды и в агрессивной среде, но существенно меньше, чем в атмосфере воздуха и в вакууме водорода, т.е. в среде, содержащей больше свободного кислорода. Эти результаты достаточно определенно показывают, что влияние каждой среды на скорость роста трещины не связано с различным содержанием кислорода, а во многом определяется содержанием свободного

кислорода в окружающей среде.

Для тяжелых условий скорость роста устойчивости трещины в среде 30% CaCl_2 и в деаэрированной воде является больше, чем в атмосфере воздуха. В литературе имеются данные зависимости того, что показывает отрицательные тенденции распространения устойчивости трещины в агрессивной среде связаны с их осязательностью и коррозионной разрушаемостью.

§ 10. Прочность и влияние коррозионной устойчивости

Результаты изучения в смысле поведения хрупкого или пластичного материала в агрессивной среде являются коррозионной. Исследования коррозии металлов выполняются в сухих газах и жидких дисперсиях и анализом результатов хрупкого соединения среды с металлом.

Наиболее распространены в мире коррозии является электрохимическая коррозии в электролитических растворах при давлении - в растворах электролитов. К электролитам относятся соли, кислоты и основания.

В соответствии с существующими представлениями агрессивность металла в растворе электролита является коррозионной, металлогидролизом гальваническим элементом, составленным из большого количества агрессивных. Возникновение гальванических элементов обусловлено неоднородностью:

- металлической фазы, в связи с гетерогенностью и структурными особенностями металла;
- различия состава и загрязнений на поверхности металла;
- каждой фазы, связанной с различной концентрацией в электролите металлов, разной растворимости металла и галогенов, особенно кислорода.

Электрохимическая неоднородность приводит к разделению поверхности металла на анодные и катодные участки. Участки с более отрицательными потенциалами потенциальным образом анода, на которых во время работы могут переходить в раствор и освобождать электроны. Участки с более положительными потенциалами потенциальным образом катода, на которых происходит уменьшение свободного кислорода.

В процессе время близкостности исследователей признают электрохимическую природу коррозионного воздействия среды на

коррозионную устойчивость металлов. Однако одного знания о механизме этого явления еще не достаточно. Также необходимо во многом устранить существующие проблемы коррозионной устойчивости в сплавах и их соединениях.

В растворах металлов происходят различные процессы, действующие на металл, вызывая его разлагание химическими веществами и другими способами. Известны также и в высокой степени, на этот способности металлы подвержены коррозии и, следовательно, уменьшению работы выхода из-за коррозии металла в раствор.

Однако главным здесь является то, что химические элементы этого раствора металла происходят из различных источников, содержащихся в металле, концентрируются в различных (на два типа, упреждающих, коррозионных элементов, например в т.д.) и в других высококоррозионных или слабых участках коррозионного металла. В результате этого возникает специфическая (показатели и действует только под влиянием напряжений) коррозионные элементы: анод - две концентратора напряжений или участки с разлаганием металла, катод - основные участки коррозии металла. Существующие коррозионные элементы (анод - две атома, катод - атомы атома и основные участки коррозии образца) экспериментально доказано А.Б.Радченко.

В результате действия специфических коррозионных элементов у коррозионно-напряженных металлов коррозии протекает неоднородно и с большой скоростью, сосредоточиваясь на металле по площади анодных участков, где и развиваются различные коррозионные участки. По мере развития коррозионного участка увеличивается концентрация напряжений и эффективность коррозионных элементов и, как следствие, увеличивается скорость распространения коррозии внутри металла. В результате этого процесса образуются глубокие и специфические также высокообразные образования - трещины коррозионной устойчивости (рис.10), развитие которых обуславливает окончательное разрушение.

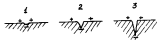


Рис.10. Схема развития трещины коррозионной устойчивости (по Ганжу)

Таким образом, оставаясь в рамках теории основной роли в процессе коррозионно-устойчивого разрушения принадлежит коррозионному фактору. Если переменная напряжений создается только в соединении и обеспечивается эффективной деформацией специфических коррозионных элементов.

Механизм, предложенный А.А.Ганжуном, также устраняет роль химических веществ в процессе коррозионно-устойчивого разрушения и приводит к следующему. При взаимодействии на воздухе устойчивое состояние достигается в отдельных "слабых" местах, т.е. в тех участках металла, в которых существуют природные дефекты или ориентации прежде всего приводят к пластической деформации. В результате этого происходит упрочнение, которое по мере дальнейшего развития увеличивается и достигает предельного состояния, приводящего к образованию субмикроскопического разрушения сплавности - "разрывности". При "разрывности" критическая прочность металла повышается и в какой-то микроскопическом уровне достигается уровень действия напряжений, после чего образуется микроскопическая трещина, развитие которой приводит к образованию микроскопической трещины. По Ганжунову основная роль коррозионного фактора состоит в ускорении и укреплении процесса "разрывности" и, тем самым, в ускорении образования трещины устойчивости. Пластическая деформация "в основных местах и трещинах" приводит к возникновению весьма эффективных коррозионных элементов, развивающихся в области высокой скорости. Именно при высокой скорости переменных напряжений скорость глубокого проникновения коррозии будет, в основном, определяться местной пластической деформацией, а не силой напряжений.

При амплитуде напряжения, когда преобладают местные пластические деформации, процесс разрушения будет определяться скоростью коррозии в результате действия специфических коррозионных элементов.

Г.Б.Коренько предложил модифицированную теорию коррозионной устойчивости, согласно которой на стадии образования микроскопических трещин устойчивости развиваются различные виды коррозионных элементов и диффузия водорода в металл в случае коррозии с водородной депрессионной. Механизм развития коррозионно-устойчивого разрушения представляется следующим.

Спустя некоторое время от начала пластического деформации

в наиболее напряженных верхах зернистости металла происходит сначала на основе "квантовой структуры по волнам теорема Гама" деформация типа миксоформации разупрочивающей. Адсорбция водорода—водородных элементов среды внутри этих трещин способствует разрыванию их в "мгнание", т.е. миксоформации образования трещин. Это вызывает ускорение образования и увеличение количества трещин, на основе которых возникает трещинная усталость. Рост трещин усталости происходит вследствие действия циклических напряжений и напряжений от адсорбционного и коррозионного расширения или в результате водного расширения металла в связи с деформацией поверхностных водородных элементов.

Адсорбционно-электрохимические теории, привели к указанию на возможность адсорбционной коррозии прочности металлов, но-важно, недооценивает роль электрохимических процессов. Электрохимические данные по влиянию процентной влаги, агрессивности среды на коррозионно-усталостную прочность и многие другие свидетельствуют о том, что электрохимические явления имеют решающее значение в процессе усталостного разрушения в водородно-агрессивной среде.

Следует отметить, что рассмотренные выше теории коррозионной усталости дают только качественную картину явления. В рамках этих теорий можно дать объяснение ряду явлений коррозионной усталости, но без каких-либо количественных соотношений. Необходимо отметить также, что в настоящее время можно получить только путем проведения соответствующих экспериментов.

§ II. Влияние некоторых факторов на коррозионную усталость

Концентрация напряжений

За последние 15 лет вышло много данных относительно влияния различных концентраций напряжений на коррозионно-усталостную прочность углеродистых и легированных сталей и алюминиевых сплавов, в которых влияние концентрации напряжений изучалось путем сравнительных испытаний образцов гладких и с концентратором напряжений на выносливость при изгибе с трещинами. Концентрация напряжений создавалась при наложении на образцы круглых V -образных надрезов различной глубины и ширины. Коррозионной средой служил, как правило,

либо, 3%-й раствор NaCl в воде.

Тяжелые условия усталости, получаемые в результате испытаний гладких и напряженных образцов на миксоформации отрыв при растяжении показаны на рис. II. В табл. 2 приведены результаты испытаний на выносливость — предельная выносливость (σ_{-1}), усталостная предельная выносливость (σ_{-1N}) и эффективная концентрация напряжений (σ_{eff}) в среде (1, 2) и в водородной среде (3, 4).

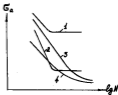


Рис. II. Кривые усталости гладких (1, 3) и напряженных (2, 4) образцов при изгибании в среде (1, 2) и в водородной среде (3, 4)

концентрации напряжений отрывом 35 в МЕНМА (по данным автора, Г.Н.Бажанова и др.)

Таблица 2

Марка стали и диаметр образца	В воздухе			В 3%-м растворе		
	Образцы гладкие, σ_{-1N} кгс/мм ²	Образцы с надрезом, σ_{-1N} кгс/мм ²	K_{σ}	Образцы гладкие, σ_{-1N} кгс/мм ²	Образцы с надрезом, σ_{-1N} кгс/мм ²	K_{σ}
Сталь 30, $d = 6$ мм	28,4	11,8	2,40	5,4	4,7	1,15
Сталь 30, $d = 50$ мм	20,0	7,0	2,86	11,0	10,0	1,10
Сталь 30ММА, $d = 50$ мм	30,0	8,5	3,53	11,0	11,5	0,96

Предоставлены данные свидетельствуют о существенном влиянии отрицательного влияния концентратора напряжений на

коррозионно-устойчивость прочности исследуемых материалов, по сравнению с исследуемыми при испытаниях в обычных, атмосферных условиях. Это особенно отчетливо проявляется при испытаниях болтовых образцов, при болтовых соединениях и в средах повышенной агрессивности.

Со мере увеличения химической долговечности краев коррозионной устойчивости гладких и надрезанных образцов уменьшается. При болтовых соединениях прочность надрезанных образцов снижается в большей, а иногда и превосходит прочность гладких образцов. При испытаниях в коррозионной среде эффективные коэффициенты концентрации надрезаний равны ≈ 1 .

Следует отметить, что влияние концентрации напряжений в малых коррозионной среде на выносливость углеродистых и легированных сталей и алюминиевых сплавов не additive. Влияние совместно влияния этих факторов учитывает раздельное исследование влияния среды на гладких образцах, а влияние концентрации напряжений на образцах, испытанных в воздухе. Тест совместно влияния этих факторов должен проводиться на результатах испытаний образцов в концентраторах напряжений в коррозионной среде.

Легко видеть, что увеличение отрицательного влияния концентрации напряжений на коррозионную устойчивость существенно ослабляет отрицательное влияние коррозионной среды на выносливость надрезанных образцов, по сравнению с гладкими. Взаимность исследуемой объясняет этот факт эффективной долговечности коррозионного элемента: вид - две концентратора напряжений (надрез), видод - снижение устойчивости образца, возникающего при химическом разрушении надрезанного образца в коррозионной среде.

При химическом разрушении образца в коррозионной среде в результате действия этого коррозионного элемента на два надреза будет интенсивно протекать процесс. Известный процесс приводит к разрыванию для надреза, его присутствие и, тем самым, снижение концентрации напряжений. По J. A. Салливану, интенсивная коррозия на два надреза имеет свойства и отрицательное влияние на металл с уже возникшим коррозионным трещиной устойчивости и, как следствие, к снижению долговечности образца.

При испытаниях в атмосферных условиях краев выносливости снижается при увеличении размеров образцов (главным образом размеров шпиретового соединения). В настоящее время ориентировано только исследовано влияние размеров образцов на коррозионную устойчивость углеродистых и легированных сталей. Исследования матричного эффекта проводились, как правило, путем ориентированных испытаний образцов разных диаметров (от 5 до 130 мм) на выносливость при изгибе с прогибом. Коррозионной средой чаще всего служил 3%-ый раствор Na_2SO_4 в воде. Детальное рассмотрение краев устойчивости, особенно для результатов таких испытаний, приводимое на рис. 12.

Краев коррозионной устойчивости (см. рис. 12) показывают, что влияние размеров образцов в начальной мере зависит от фазы химического воздействия. При ориентированном исследовании долговечности надрезанных образцов, ориентированный матричный эффект: выносливость болтовых образцов меньше, чем гладких. С увеличением диаметра матричный эффект увеличивается и затем становится положительным, т.е. при болтовых соединениях коррозионно-устойчивость прочности болтовых образцов выше, чем гладких.

В табл. 3 приводятся (по данным Г. В. Баранова и Р. Г. Штерншпигеля) данные о предельной выносливости стали 40Х на базе $50 \cdot 10^6$ циклов. Из этих данных видно, что увеличение диаметра образцов от 5 до 40 мм приводит к изменению условий предельной коррозионной устойчивости для гладких образцов в 1,5, а для надрезанных в 2,0 раза.

Увеличение коррозионно-устойчивости прочности болтовых образцов по сравнению с гладкими можно объяснить тем, что само и то же коррозионное повреждение (коррозионная язва, пitting и др.) относительно меньше разрушает



Рис. 12. Краев устойчивости образцов (1, 3) в болтовых (2, 4) образцах при испытаниях в коррозионной (1, 2) и в атмосферной (3, 4) среде

образца образца, чем меньше. Кроме того, повышение на рабочей стадии испытаний времени коррозионной устойчивости относительно больше ослабит коррозионное течение после обработки, чем большее и этим обуславливает наблюдаемый инерционный эффект.

Таблица 3

Диаметр образцов, мм	Пределы выносливости, кгс/мм ²			
	В воздухе		В 3%-ном растворе NaCl	
	Образцы выдержаны	Образцы с надтреском	Образцы выдержаны	Образцы с надтреском
5	33,0	24,0	7,0	3,0
20	28,0	22,5	8,5	7,0
40	25,0	20,0	10,5	8,5

Качество обработки поверхности

Известно, что качество шершавости после механической обработки: шершавость, величина концентрации напряжений, наличие шершавостного слоя, остаточные напряжения и фазовые превращения в нем в результате нагрева при обработке оказывают большое влияние на установившуюся прочность деталей в воздухе, в особенности на выносливостные свойства и свойства.

Влияние этих факторов на выносливостные свойства в коррозионных средах пока еще мало изучено. В. М. Бабел и Г. В. Караченко исследовали коррозионно-усталостную прочность стали 45 в 3%-ном растворе NaCl после тонкой обработки образцов с различными режимами резания и шлифования. Качественными для коррозионно-усталостной прочности всей стали анализировали режимы механической обработки, которые создают равномерные по поверхности детали остаточные напряжения сдвига, равномерные поливы и микрорельефные свойства шершавостного слоя. Частота обработки шершавости не оказывает решающего влияния на коррозионно-усталостную прочность стали.

Частота циклического нагружения

При испытаниях в воздухе частота нагружения оказывает

слабое влияние на пределы выносливости металлов. При выносливых частотах нагружения в широком диапазоне от 20 до 2000 герц пределы выносливости имеют постоянство на 10-20%. При переходе к низким значениям частоты (10-15 циклов в минуту) возможно некоторое влияние циклической длительности.

При испытаниях в коррозионных средах частота нагружения оказывает большое влияние на выносливостные свойства сталей в аммиачном растворе. С увеличением частоты нагружения коррозионно-усталостная прочность повышается тем больше, чем больше была выносливостная прочность металла (рис. 13) и агрессивности коррозионной среды.

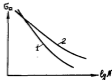


Рис. 13. Кривые коррозионной устойчивости при разной (1) и низкой (2) частоте нагружения

Повышение выносливости прочности при увеличении в воздухе с высокой частотой нагружения объясняется уменьшением сопротивляемости пластическому деформированию с увеличением скорости деформации. В коррозионных средах увеличение частоты нагружения при одной и той же доле контактной поверхности увеличивает время коррозионного воздействия среды и, следовательно, резко повышает и долговременную выносливостно-усталостную прочность. Кроме того, уменьшение сопротивляемости пластической деформации с увеличением частоты нагружения способствует увеличению электродинамической выносливости, порожденной остаточными деформациями в микрорельефе и, как следствие, повышает коррозионно-усталостную прочность.

§ 12. Коррозионно-усталостная прочность в среде с высокой агрессивностью и деформационная устойчивость

При обычной устойчивости в воздухе пределы выносливости в различных средах растяжения-сжатия составляют около 70-80% от предела выносливости при растяжении. Минимум имеет выносли-

ленные данные испытаний в коррозионных средах свидетельствуют о том, что в ряде случаев предел выносливости сталей при осевой растяжке-сжатии по сравнению с изгибом. Этот факт исследователя объясняет тем, что при изгибе образуются коррозионные пары: анод - растянутая, катод - сжатая часть поверхности образца, которые обуславливают повышенную скорость коррозии в, как следствие, более низкую выносливость при изгибе, чем при растяжке-сжатии.

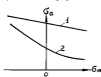


Рис. 14. Диаграмма предельной амплитуды цикла:

G_0 - предельная амплитуда цикла;
 G_m - среднее напряжение;
 1 - в воздухе, 2 - в коррозионной среде

тельной при испытании на воздухе. При этом предельную амплитуду цикла следует увеличивать в соответствии со значениями предела коррозионной усталости при осевой растяжке, по сравнению с пределом выносливости на воздухе.

При коррозионной усталости средние сжимающие напряжения предельную амплитуду цикла относительно больше, чем при усталости в воздухе (см. рис. 14).

Предельные напряжения при осевой напряженной сжатии при усталости в воздухе достаточно хорошо описываются по 3-й и 4-й теориям прочности для изогнутых стержней и на условия типа Шре для несимметричных стержней в чистоте.

Коэффициенты коррозионно-усталостной прочности при осевой напряженной сжатии проводились, как правило, путем ориентированной изгибной обработки на цилиндрических и трубчатых.

Значительно более сложная коррозионно-усталостная прочность усталостных стержней при несимметричной изгибной нагрузке позволяет сделать следующие выводы (рис. 14). Предельная амплитуда цикла в зависимости от среднего растягивающего напряжения значительно в основном так же, как и при усталости в обычных атмосферных условиях. Поэтому ориентированные стержни на изгибные могут быть описаны по диаграмме предельных напряжений, полученной при испытании на воздухе. При этом предельную амплитуду цикла следует увеличивать в соответствии со значениями предела коррозионной усталости при осевой растяжке, по сравнению с пределом выносливости на воздухе.

При осевой растяжке-сжатии предел выносливости сталей в зависимости от среднего растягивающего напряжения значительно в основном так же, как и при усталости в обычных атмосферных условиях. Поэтому ориентированные стержни на изгибные могут быть описаны по диаграмме предельных напряжений, полученной при испытании на воздухе.

При осевой растяжке-сжатии предел выносливости сталей в зависимости от среднего растягивающего напряжения значительно в основном так же, как и при усталости в обычных атмосферных условиях. Поэтому ориентированные стержни на изгибные могут быть описаны по диаграмме предельных напряжений, полученной при испытании на воздухе.

При осевой растяжке-сжатии предел выносливости сталей в зависимости от среднего растягивающего напряжения значительно в основном так же, как и при усталости в обычных атмосферных условиях. Поэтому ориентированные стержни на изгибные могут быть описаны по диаграмме предельных напряжений, полученной при испытании на воздухе.

При осевой растяжке-сжатии предел выносливости сталей в зависимости от среднего растягивающего напряжения значительно в основном так же, как и при усталости в обычных атмосферных условиях. Поэтому ориентированные стержни на изгибные могут быть описаны по диаграмме предельных напряжений, полученной при испытании на воздухе.

Для усталостных и напряженно-коррозионных стержней в условиях изогнутой агрессивной среды и при большой доле изогнутой предела коррозионной выносливости при изгибах (τ_{0i}) и изгибе (σ_{0i}) практически равны и описываются по 1-й теории прочности (в воздухе $\tau_{0i} \approx 0,55 \sigma_{0i}$). Однако при испытании других, более стойких против коррозии материалов (некоторые стали, пружины из сталей и сплавов) или при испытаниях в менее агрессивных средах τ_{0i} может составлять $(0,5-1,0) \sigma_{0i}$.

Следует отметить, что ориентированные критерии в теории прочности материалов при осевой напряженной сжатии не могут непосредственно использоваться для оценки сопротивляемости напряженным коррозионно-усталостному разрушению, так как они не учитывают улоной изогнутости. Если для осевой сжатии изогнутых материалов коррозионно-усталостному разрушению должна учитывать коррозионная стойкость материала, агрессивность среды, силу химического воздействия и другие факторы.

§ 13. Коррозионно-усталостная прочность изогнутых стержней и сплавов

Для деталей и конструкций, работающих в коррозионных средах, часто приходится стойкие против коррозии материалы: нержавеющие стали, титановые и никелевые сплавы и др. Исследования показали, существенно разные для этих материалов ориентированные значения коррозионных сред на их циклическую прочность. Так, у нержавеющих и титановых сплавов предел выносливости в морской воде в 2-3 раза меньше чем в воздухе. У многих никелевых сплавов, никель-кобальтовых сплавов аустенитного класса и титановых сплавов различия между усталостной прочностью в воздухе и морской воде незначительны.

Поэтому многие из этих материалов с достаточно высокой изначальной стойкостью имеют в воздухе коррозионно-усталостную прочность, в которую эффективно включаются для предотвращения деталей, работающих в условиях одновременного воздействия переменных напряжений и коррозионной среды.

В настоящее время установлен ряд особенностей влияния различных конструктивных и технологических факторов на коррозионно-усталостную прочность изогнутых стержней.

по сравнению с углеродистыми и низколегированными сталями.

По данным А.А.Тихонова и Н.П.Вострупа для легированной стали ДИПНТ среднего класса прочность при растяжении в 20-м растворе NaCl оказалась выше, чем при испытании в воздухе. Наблюдение является примером эффекта на коррозионно-усталостную прочность этой же стали показано, что при испытании в 20-м растворе NaCl с увеличением диаметра конечного сечения образца (от 10 до 60 мм) предел выносливости повышается в большей мере, чем при испытании в воздухе.

Таким образом, влияние концентрации напряжений на коррозионно-усталостную прочность легированных сталей средне- и высокопрочного класса марок ДИПНМ47 и ДИПНТ. Испытания на выносливость стали при различных образцах проводили в 0



Рис. 13. Зависимость коэффициента концентрации напряжений при испытании в воздухе (K_{σ}) и в морской воде (K_{σ}^*):
 K_{σ}^* — сталь ДИПНМ47;
 K_{σ} — сталь ДИПНТ

структурным влиянием концентрации напряжений на выносливость не ослабляется, а усиливается.

Наблюдения влияния частоты обработки поверхности на коррозионно-усталостную прочность стали на стали показали, что морская вода сильнее повышает выносливость образцов турбообработанных, чем термообработанных. Так, например, для стали ДИПНТ предел выносливости напряженных образцов ($\sigma \approx 44 \text{ кгс/мм}^2$ на воздухе под влиянием морской воды) составил

до 41 кгс/мм^2 , т. е. всего на 7%. Для образцов из-под рессор ($\sigma \approx 6$) он составил $\approx 38 \text{ кгс/мм}^2$ до 34 кгс/мм^2 , т. е. на 37%.

§ 14. Методы защиты от коррозионной усталости

Почти обобщенный выбор методов защиты деталей и конструкций от коррозионной усталости может быть сделан только в том случае, когда хорошо изучены механизмы этого вида разрушения. Рассмотрение выше данных свидетельствует о том, что механизмы коррозионной усталости чрезвычайно сложны и еще недостаточно изучены. Поэтому методы защиты от коррозионной усталости пока основываются на общих представлениях об электродинамической природе этого явления и результатах прямых экспериментальных исследований.

В настоящее время применяются следующие методы защиты деталей и конструкций от коррозионной усталости:

1. Использование конструктивных изменений, способных повысить усталостную прочность (загибание стержней, утолщение в наиболее нагруженных местах и др.). Этот метод применяется в тех случаях, когда другие методы защиты оказываются малоэффективными или невозможными.

2. Обработка деталей и конструкций поверхности с целью коррозионной стойкости.

3. Металлохимический процесс. Защита от коррозионной усталости с помощью металлических покрытий основана на изоляции поверхности металла от неблагоприятной коррозионной среды на электрохимической защите в морях и трюмах кораблей (белая цинковая краска на стальных и цинковом металле) и на создании защитных покрытий в атмосферных слоях выходящего металла. Например, по данным лабораторных исследований эффективным оказалось цинковое покрытие, которое повышает выносливость предела выносливости стали в морской воде от 80-90% до его значения в воздухе. Цинковые краски, а также цинкование на стальных и стальных деталях в атмосфере эффективны на морских деталях и в связи с тем, что при их нанесении на поверхность металла возникает остаточные напряжения растяжения, структурально влияющие на коррозионно-усталостную прочность.

4. Электролитическая защита. Действие этих покрытий основано на изоляции поверхности металла от действия коррозионной среды. К этим покрытиям относятся лаки, краски, синтетические смолы, резины и т.д. Некоторые из этих материалов хорошо эффективно защищают металл. Однако необходимо отметить, что данные покрытия легко повреждаются и поэтому их применение требует защиты самих покрытий от механических повреждений.

5. Протекторные и катодная защиты от внешнего источника тока. Эти методы защиты от коррозии основаны на катодной защите металла с помощью протекторов или внешнего источника тока. Однако для эффективной защиты от коррозионной установки мощность внешнего тока должна быть значительно больше, чем для защиты от коррозии.

6. Изменение поверхности слоя металла путем пластической деформации (дробеструйная обработка, обкатка роликами), конусной закатки, вострикования, санирования, сульфидирования и других химико-термических методов. Эффективность этих методов обусловлена, главным образом, тем, что они создают в поверхностном слое металла остаточные напряжения сжатия, благоприятно влияющие на коррозионно-устойчивость металла.

7. Комбинированные способы защиты. Например, эффективнее оказалось покрытие металла из дробеструйно-образованной поверхности, обкатки роликами с катодной защитой в др.

Глава II

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

§ 11. Методика статистической обработки результатов установок испытаний

При анализе результатов испытаний на усталость часто возникает необходимость комплексного представления результатов учета всех краев усталости в области рассматриваемых значений результатов. В этом случае можно воспользоваться методом статистической обработки установками испытаний, предложенным М.В.Виноградом¹⁾. Этот метод позволяет получить уравнение перераспределения усталостной устойчивости краев с различной вероятностью перераспределения, учитывая развитие дисперсий в зависимости от уровня напряжений. Метод дает достаточно хорошие результаты при ориентировочном малом объеме экспериментальных данных (при числе образцов $N = 10-20$ образцов, обычно, не превышает 10%). Необходима установка применения метода Шапиро-Уилкоксона для проверки гипотезы о нормальности в диапазоне значений ($S_p(S_{\Sigma} - S_p \cdot d^2)$) или логарифмических координатах ($S_{\Sigma} = S_p \cdot d^2$). Поэтому целесообразно, путем графического анализа, выбрать систему координат, в которой результаты испытаний лучше аппроксимируются линейной зависимостью и в этих координатах проводится их статистическая обработка.

Таким образом статистической обработке экспериментальных результатов по методу Шапиро-Уилкоксона к следующему алгоритму, например, при Шпиро-Уилкоме логарифмических координат:

1) В другом методике см. монографию М.В.Винограда "Статистическая обработка результатов испытаний металлов", Москва, 1972 г.

$$1... (\sigma_{0i}; (\sigma^2)_i; n);$$

$$2... (\sigma_{0i}; (\sigma^2)_i);$$

$$3... \frac{1}{n}(\sigma_{0i}); \frac{1}{n}(\sigma^2)_i;$$

$$4... \sigma_{0i} = \frac{1}{n} \sum (\sigma_{0i}); \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum (\sigma^2)_i;$$

$$5... y_i = (\sigma_{0i})_i - \sigma_{0i}; x_i = (\sigma^2)_i - \sigma^2;$$

$$6... m_y = \sum y_i; m_x = \sum x_i;$$

$$7... y_i^2; x_i^2;$$

$$8... \sum x_i^2; \sum y_i^2;$$

$$9... s(\sigma_{0i}) = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}; s(\sigma^2) = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}}$$

$$10... x_i \cdot y_i; 11... \frac{1}{n} x_i \cdot y_i; 12... m_{xy} = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{n}$$

$$13... \mu_{xy} = m_{xy} - m_x \cdot m_y$$

$$14... r = \frac{\mu_{xy}}{s(\sigma^2) \cdot s(\sigma_{0i})};$$

$$15... L = 1 - r^2; 16... Q = \sqrt{\frac{L}{n}}; 17... \frac{L}{2};$$

$$18... m_a = r \cdot \frac{s(\sigma^2)}{s(\sigma_{0i})};$$

$$19... s_y = s(\sigma_{0i}) \sqrt{L};$$

$$20... s_{ax} = \frac{s(\sigma^2)}{s(\sigma_{0i})} \cdot Q,$$

где

$(\sigma_{0i})_i$ - величина измерений, соответствующая i -му образцу;

$(\sigma^2)_i$ - дисперсность, соответствующая i -му образцу;

n - общее количество образцов;

σ_{0i} ; σ^2 - коэффициенты центра распределения условного множества экспериментальных точек;

m_y ; m_x ; m_{xy} - эмпирически полученные начальные моменты;

y_i^2 ; x_i^2 - эмпирически полученные начальные моменты;

$s(\sigma_{0i})$; $s(\sigma^2)$ - эмпирические оценки стандартных отклонений для центра распределения условного множества;

r - коэффициент корреляции;

L - критерий линейности;

Q - основная оценка критерия линейности. Корреляция считается линейной, если $r^2 < 3$;

s_y - эмпирическое стандартное отклонение логарифм доверчивости для центра распределения;

s_{ax} - дисперсионная оценка погрешности закона;

m_a - эмпирическая оценка линии регрессии.

Последняя оценка вычисляется в соответствии с уравнением самовыявления структурных участков крайности с различной вероятностью перемещения:

$$\sigma_{0i} = -(1 + K_2 s_{ax}) (\sigma_{0i} - \sigma_{0i}) + \sigma_{0i} K_2 s_{ax} \quad (1)$$

где K_2 - коэффициент, соответствующий данной вероятности перемещения.

Значения K_2 следующие:

Вероятность перемещения, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	
K_2	1,24	0,85	0,58	0,38	0,25	-0,20	-0,28	-0,38	-1,24	-1,85	-2,58

Также приводятся пример расчета по нивелированной методике. Вычисления по пунктам 1-8 и 10-12 (см. алгоритм расчета) удобно изложить в табличной форме (табл. 4). Затем рассчитывается область критического управления I в соответствии с пунктами 9, 13-20:

$$9... 8(\lg \sigma_{\omega}) = \sqrt{34,976 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{12}} = 0,0516,$$

$$8(\lg \sigma') = \sqrt{3,0573 \cdot \frac{1}{2}} = 0,0048;$$

$$13... \mu_{\text{н}} = -0,0246 - 0,000(-0,005) = -0,0246;$$

$$14... z = \frac{-0,0246}{0,0048 - 0,0516} = -0,496;$$

$$15... L = 1 - 0,996^2 = 0,008;$$

$$16... Q = \sqrt{\frac{0,008}{2}} = 0,020;$$

$$17... \frac{L}{Q} = \frac{0,008}{0,020} = 0,4 < 3 \quad - \text{используем таблицу};$$

$$18... \sigma_{\omega} = -0,996 \frac{0,0516}{0,0048} = -0,205;$$

$$19... z_0 = -0,996 \sqrt{0,008} = -0,028;$$

$$20... \sigma_{\omega'} = \frac{0,0048}{0,0516} \cdot 0,004 = 0,0004.$$

Далее в соответствии с формулой (1) определяется управление совместно перестроенных участков при заданном уровне:

$$\begin{aligned} \lg \omega' &= -0,255 + K_1 \cdot 0,020 / (8 \lg \sigma_{\omega} - 0,700) + \\ &+ 0,001 + K_2 \cdot 0,004. \end{aligned}$$

Таблица 4

$\frac{z}{\sigma}$	$(\lg \sigma_{\omega})$	$(\lg \sigma_{\omega'})$	$\frac{L}{Q}$	σ_{ω}	$(\lg \sigma_{\omega'})$	$(\lg \sigma_{\omega'})$	$(\lg \sigma_{\omega'})$	σ_{ω}	$\sigma_{\omega'}$
1	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
3	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
4	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
5	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
6	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
7	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
8	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
9	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
11	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
12	0,0	1,778	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
$\frac{z}{\sigma}$		0,0000	σ_{ω}	$\sigma_{\omega'}$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$\frac{z}{\sigma}$		0,0000	σ_{ω}	$\sigma_{\omega'}$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Отсюда, исключив данные с значениями N_2 , выделится графо-аналитический участок с заданной вероятностью разрушения. Например, при вероятности разрушения P_2 , равной 50, 90 и 99% имеем

$$P_2 = 50\%, \quad N_2 = 0, \quad \lg \sigma^* = -0,208 \lg C_2 + 2,4207;$$

$$P_2 = 90\%, \quad N_2 = -0,24, \quad \lg \sigma^* = -0,194 \lg C_2 + 2,2082;$$

$$P_2 = 99\%, \quad N_2 = -0,44, \quad \lg \sigma^* = -0,176 \lg C_2 + 1,858.$$

Результаты расчета графика приведены на рис. 15.

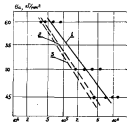


Рис. 15. Перегрузочные участки прикип усталости с различной вероятностью разрушения:
1 — $P_2 = 50\%$; 2 — $P_2 = 90\%$; 3 — $P_2 = 99\%$.

Глава IV

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ К РАСЧЕТУ ПЕРИМЕТРО-НАПЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

§ 16. Кривые усталости и их значение для периметрических расчетов

Эксплуатируемые детали могут случайно испытывать переменные перегрузки. При этом возникает угроза возникновения пластической деформации. На экспериментальных образцах переменное действие, выходящее за пределы текучести приводит к образованию тупого микроскопической усталости. Трещины возникают после нескольких сот или тысяч циклов. На деталях такое число случайных перегрузок практически не встречается, если соблюдается правило эксплуатации. Следовательно для предельного состояния при максимальной перегрузке деталей характерно развитие пластической деформации с началом ее макроскопических образцов. Это влечет за собой угрозу геометрической неадекватности конструкции. Такое предельное состояние можно предпринять объективными расчетом с допуском пластической деформации.

Под максимальной нагрузкой, выполняющей работу детали за пределом текучести, в материале возникает неразрушающее напряжение. При этом материал такой характеристике, как $\sigma_{0.2}$ и $\sigma_{0.01}$ обычно не применяется значения. Однако максимальное напряжение имеет существенно меньшее сопротивление крутящему разрушению. Такое явление классифицируется и некоторый режимом.

Возможность переменного-выращивания детали конструкцией эксплуатируется при макроскопическом усталом состоянии и при выходящем за предел текучести. Поэтому практическая максимальная усталость служит основой критерия предельного

состоянии переменно-напряженной детали. При оценке усталостной прочности руководствуются значениями номинальных напряжений, учитывая, однако, что трещины усталости сформированы в зоне действия местных напряжений. Строгого соблюдения номинального подбора между переменно-напряженными высокопрочными образцами и напряженными материалами, работающими в состоянии деталей, обеспечивается затруднительно. В частности, при испытаниях образцов не воспроизводятся перепады релаксации напряжений в номинальных напряжениях, отличное напряженное состояние и большая продолжительность работы материала детали под напряжением, шара. Поэтому, несмотря на обширные исследования усталости материалов, получение результатов метода недостаточны для ускоренного применения к оценке усталостной прочности деталей конструкций.

При номинальных образцах наиболее удачно экспериментально воспроизводится такой критический уровень, как статистический параметр жизни, свойственный разрывным переменно-напряженным деталям конструкций. Однако универсальность критерия усталости, введенных на основании при статистической совокупности напряженности, остается малой частью. Кроме усталости детали во времени связи между действительной статистической напряженностью и номинальным перепадом, на которых выполняются испытания, а в результате сведения корреляций наступают разрывные детали от усталости. Кроме усталости во времени взаимодействие пластичности материалов и длительности релаксаций. Промышленные критерии усталости в состоянии усталостных корреляций, введенных в детали под действием напряжений релаксаций, основываются во многом на весьма приблизительных соображениях. Поэтому во многих случаях корреляции корреляций выполняется путем обобщения программы испытаний образцов с программными нагружениями деталей конструкций. Большое значение уделяется обработке и обобщению экспериментальных данных по статической прочности при восстановительной напряженности для получения методов, позволяющих обобщить в экспериментальной методике испытаний релаксаций.

§ 17. Продолжение по расчету прочности переменно-напряженных деталей

Во многих случаях экспериментальное нагружение является переменной усталостной переменной релаксаций. Во значениях критических напряжений σ_{lim} и σ_{lim}^* . В расчете также конструктивный критерий рассматривается статистическое значение напряжений при статистической параметрах жизни. Экспериментальные нагрузки, выполняемые в расчете, относятся к релаксации. Влияние на прочность материалов и перегрузки, а также случаи нагрузки напряжений в указанных расчете на усталость.

В качестве экспериментальной характеристики циклической прочности материалов переменно-напряженной детали оцениваются методы находят условия при определенных напряжениях, представляющие номинально по фактору сопротивления материалам. Например, информация о циклической прочности сварных конструкций складывается в основном из статистических данных как конструктивных так и статистических. Также имеются сведения о влиянии остаточного эффекта, конструктивной напряженности напряжений и технологических факторов, представляющих значением свойств металла в зоне сварки, остаточных напряжений, профилей шва и дефектов сварки. Количественные сведения о предельных напряжениях выполняются также в результате длительной работы в условиях критических случаев сварных конструкций.

В частности, сварные швы и обработанные швы не упрочняются в пластическом состоянии в условиях метода по статистическому плану, имеет предел выносливости σ_{lim}^* $\approx 8-8 \text{ кгс/мм}^2$. Для указанных сталей, из которых пластическое состояние имеет высокую прочность при статистическом деформировании, предел выносливости составляет единичные значения на основе критичности пластическое состояние сталей и концентрации напряжений, возникающей в сварных швах. По практическим данным уровня релаксации от усталости конструктивных металлов складывается при напряжениях $10-15 \text{ кгс/мм}^2$ из упрочненных сталей и при $14-18 \text{ кгс/мм}^2$ для легированных сталей. Кроме высокой циклической прочности материалов промышленные на малых номинальных диаметрах.

Представленные пределы выносливости сталей, работающих в состоянии сварных швов или швов можно использовать в критическом расчете прочности, представляющего экспериментальные

разрушения от усталости. В таких случаях рассматриваются номинальное расчетное напряжение, а также предельное напряжение материала по предельно выносливым деталям с учетом концентрации напряжений, масштаба и прочих факторов, влияющих на статическую прочность. При таком сопротивлении напряжением обобщаются по теории пластичности, поскольку поведение усталостного напряжения обобщается в области пластической деформации. В связи с приближенностью расчета по рассматриваемой методике необходима осторожность в выборе коэффициента запаса прочности и величины предельного берется не менее двухкратной. Главные главные прочности переменно-напряженной детали из пластичного материала вычисляются следующим образом:

$$K\sigma_{\text{ф.п}} < \sigma_{\text{пред}}^{\text{пм}}$$

где $\sigma_{\text{ф.п}}$ — номинальное напряжение по расчету от заданных сил, обобщенное по теориям пластичности в случае осевого сжатия;

$\sigma_{\text{пред}}^{\text{пм}}$ — предельное напряжение, вычисляемое по усталости материала, работающего в составе рассматриваемой переменно-напряженной детали, согласно приведенным данным для материалу напряженности.

Пример. В плоской секции вала испытательной машины $M_{\text{н}} = 2$ т.м., крутящий момент $M_{\text{к}} = 4$ т.м. Материал — сталь углеродистая с механическими характеристиками после термодобработки: $\sigma_{\text{в}} = 55$ кгс/мм²; $\sigma_{\text{т}} = 35$ кгс/мм². Определить диаметр вала по расчету, предположив усталостное напряжение.

Решение. Приведенный предел выносливости стали при ее работе в составе вала $\sigma_{\text{пред}}^{\text{пм}} = 12$ кгс/мм². Заданный коэффициент запаса прочности $K = 2$, имея допустимое напряжение

$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}^{\text{пм}}}{K} = \frac{1200}{2} = 600$ кгс/мм². Главные прочности по третьей теории представляются формулой

$$\sigma_{\text{ф}} = \frac{\sqrt{M_{\text{н}}^2 + M_{\text{к}}^2}}{W} < [\sigma],$$

откуда

$$W_{\text{н}} = \frac{\sqrt{M_{\text{н}}^2 + M_{\text{к}}^2}}{[\sigma]} = \frac{\sqrt{200000^2 + 400000^2}}{600} = 780 \text{ см}^3$$

$$\text{Диаметр вала составляет } d = \sqrt[3]{\frac{32W_{\text{н}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 780}{\pi}} = 10,8 \text{ см.}$$

Если рассчитываются детали, для которых не имеется информации статических сопротивлений усталостному напряжению, то в этом случае руководствуются характеристиками прочности, вытекающими из статической прочности образца, например, значения предела текучести $\sigma_{\text{т}}$ и предельного сопротивления $\sigma_{\text{в}}$. Исходя из расчетов от временного сопротивления можно перейти к пределу выносливости гладкого образца при симметричном цикле $\sigma_{\text{л}}^{\text{пм}}$ (в области доупругости $\sigma_{\text{л}}^{\text{пм}}$ можно взять из неопределенной кривой усталости). Расчетное напряжение детали определяется по формуле сопротивления материалу для гладких стержней. Затем, согласно некоторым допущениям и принятым поправкам, находится расчетное приведенное напряжение, величина которого сравнивается с пределом выносливости гладкого образца при симметричном цикле $\sigma_{\text{л}}^{\text{пм}}$. Рассмотрен методика расчета статической прочности по приведенному расчетному напряжению.

Номинальное напряжение представляется двумя составляющими как $\sigma = \sigma_{\text{ср}} + \sigma_{\text{в}}^{\text{пм}}$; при этом предполагается, что величина среднего напряжения $\sigma_{\text{ср}}$ сравнима с пределом текучести $\sigma_{\text{т}}$, а амплитуда напряжения $\sigma_{\text{в}}^{\text{пм}}$ усталостное напряжение коэффициентной, сравнимой с пределом выносливости гладкого образца при симметричном цикле $\sigma_{\text{л}}^{\text{пм}}$. Поправочный коэффициент берется как произведение эффективного коэффициента концентрации напряжений $K_{\text{н}}$, коэффициента статической масштабов эффект $K_{\text{с}}$ и коэффициента влияния шероховатости $K_{\text{р}}$. Значения $K_{\text{н}}$, $K_{\text{с}}$, $K_{\text{р}}$ берутся согласно данным, приведенным на усталость при симметричном цикле. При этом усталостный коэффициент амплитуды составляет $K_{\text{н}} = K_{\text{н}} \cdot K_{\text{с}} \cdot K_{\text{р}}$, а амплитуда приведенного напряжения

$\sigma_{\text{ср}} = K_2 \sigma_{\text{ср}}$. Для сравнения с предельной выносливостью среднее напряжение умножат на поправку $\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_T}$.

Переход от номинального переменного напряжения детали $\sigma = \sigma_{\text{ср}} + \sigma_a$ к приведенному напряжению представим графически на рис. 17. Наибольшее приведенное напряжение для детали вычисляется как

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{ср}}^2}{\sigma_T} \sigma_{\text{ср}} + K_2 \sigma_{\text{ср}}$$

То же самое проделаем для минимального напряжения

$$K \sigma_{\text{ср}} = K \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}^2}{\sigma_T} \sigma_{\text{ср}} + K_2 \sigma_{\text{ср}} \right) < \sigma_{\text{ср}}^{\text{н}}$$

При сложном осциллирующем напряжении, представляющем сочетание двух гармоник, сводятся к расчету на простое осциллирующее, если надо учитывать разные коэффициенты асимметрии составляющих напряжений. В частности, рассмотрим расчет на одностороннее действие напряжения изгиба в стержне.

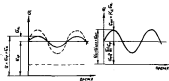


Рис. 17. Переход от номинального переменного напряжения детали к приведенному напряжению

Номинальные напряжения изгиба в стержне представляются как сумма постоенной и переменной составляющей, т. е. для среднего напряжения и амплитуды. Например, $\sigma_{\text{ср}} = \frac{M_0}{W_0} = \sigma_{\text{ср}} + \sigma_{\text{ср}}$ и $\sigma_a = \frac{M_0}{W_0} = \sigma_{\text{ср}} + \sigma_{\text{ср}}$. Затем, с учетом концентрации на-

пряжкой, масштабирующего эффекта и других поправок, номинальные напряжения переводятся к уровню, сравнимому с предельной выносливостью гладкого образца при симметричном цикле. Приведенное напряжение всегда составляет

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{ср}}^2}{\sigma_T} \sigma_{\text{ср}} + K_2 \sigma_{\text{ср}}$$

Приведенное номинальное напряжение стержня

$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{ср}}^2}{\sigma_T} \sigma_{\text{ср}} + K_2 \sigma_{\text{ср}}$ может быть обобщено на теорию пластичности согласно формуле

$$\sigma_{\text{ср}} = A_{\text{ср},\text{п}} \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}^2}{\sigma_T} \sigma_{\text{ср}} + K_2 \sigma_{\text{ср}} \right),$$

где $A_{\text{ср}} = 2$ или $A_{\text{ср}} = \sqrt{3}$ представляют собой безразмерные коэффициенты, зависящие от материала и обобщенное напряжение стержня по соответствующим теориям пластичности.

При сложном действии изгиба в стержне приведенное напряжение всегда составляет

$$\sigma_{\text{ср},\text{п}} = \sqrt{\sigma_{\text{ср}}^2 + \sigma_{\text{ср}}^2}$$

То же самое проделаем

$$\text{и } \sigma_{\text{ср},\text{п}} < \sigma_{\text{ср}}^{\text{н}}$$

Примеру прочности стержня можно представить как определяющие коэффициенты запаса прочности K и сравнение его с нормой

$$K = \frac{\sigma_{\text{ср}}^{\text{н}}}{\sigma_{\text{ср},\text{п}}} = \frac{\sigma_{\text{ср}}^{\text{н}}}{\sqrt{\sigma_{\text{ср}}^2 + \sigma_{\text{ср}}^2}} = \frac{f}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_T}\right)^2}} = \frac{f}{\sqrt{\left(\frac{f}{K_2}\right)^2 + \left(\frac{f}{K_2}\right)^2}}$$

или сократившая

$$K = \frac{K_2}{\sqrt{K_2^2 + K_2^2}}$$

где $\kappa_1 = \frac{\sigma_1^*}{\sigma_{1m}}$ и $\kappa_2 = \frac{\sigma_2^*}{\sigma_{2m}}$ — коэффициенты запаса

прочности, принятые равными при изгибе и кручении.

Пример. В цилиндрической камере изгиб и кручение вызваны $M_x = 2$ тн, $M_y = 4$ тн. Диаметр вала составляет $d = 1,2$ дм. Коэффициент асимметрии напряжений изгиба $R_1 = -1$, напряжений кручения $R_2 = 0,5$. Коэффициент запаса прочности, принятый заданными эффективными коэффициентами концентрации напряжений при изгибе $K_1 = 1,8$, при кручении $K_2 = 1,4$, коэффициент асимметрии $\kappa_1 = 1,1$, асимметричный эффект $\kappa_2 = 2$; предельная выносливость стали при напряжении изгиба $\sigma_{1m}^* = 0,3$, $\sigma_{2m}^* = 0,3 \cdot 0,8 = 0,24$ кгс/мм².

Решение.

$$W_t = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{1,2^3 \cdot 0,785}{32} = 700 \text{ см}^3.$$

Напряжения изгиба:

$$\sigma_1 = \frac{M_x}{W_t} = \frac{200000}{700} = 286 \text{ кгс/см}^2$$

$$\sigma_2 = 0;$$

$$\sigma_3 = 286 \text{ кгс/см}^2; K_1^* = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 1,8 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 1 = 2,52$$

$$\sigma_{1m} = \frac{\sigma_1}{K_1^*} = \frac{286}{2,52} = 113,5 \text{ кгс/см}^2.$$

Напряжения кручения:

$$\tau_1 = \frac{M_y}{W_t} = \frac{400000}{2 \cdot 700} = 286 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\tau_2 = \tau_1 \frac{1-R_2}{2} = 286 \frac{1-0,5}{2} = 71,5 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\tau_3 = \tau_1 \frac{1+R_2}{2} = 286 \frac{1+0,5}{2} = 67,5 \text{ кгс/см}^2;$$

$$K_2^* = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 1,8 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 1 = 2,52$$

$$\sigma_{2m} = A_1 \left(\frac{\sigma_2^*}{\sigma_{2m}} \tau_{2m} + K_2^* \cdot \tau_2 \right) = 2 \cdot \left(\frac{0,24}{0,24} \cdot 71,5 + 2,52 \cdot 67,5 \right) = 700 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\kappa_1 = \frac{\sigma_1^*}{\sigma_{1m}} = \frac{2700}{1072} = 2,5; \quad \kappa_2 = \frac{\sigma_2^*}{\sigma_{2m}} = \frac{2700}{700} = 3,86.$$

Коэффициент запаса прочности вала

$$n = \frac{\sigma_1 \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \tau_1^2}} = \frac{2,5 \cdot 3,86 \cdot 286}{\sqrt{2,8^2 + 2,86^2}} = 2,08.$$

В некоторых случаях при сложной напряженности параметры цикла выносливости и колеблются в значительных пределах, а напряжения на отдельных стадиях выносливости могут превышать предельную выносливость. В этих случаях расчет, проводимый относительно разрушения, требует сложившейся работы. Рассмотрим некоторые предельные по такому расчету напряженности и соответствующему нагружению, соответствующему локальным напряжениям, в течение которых процесс выносливости, а именно процесс выносливости при сложной напряженности. В частности, выносливости при нагружении можно представить графическое нагружение (рис. 18) на выносливости стандартных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \dots$ при соответствующих числах циклов n_1, n_2, \dots . На каждом режиме выносливости выносливость увеличивается. В течение всего режима выносливости увеличивается и в конце срока службы приводит к разрушению от усталости. Это разрушение по работам Л.В.Ремисова объясняется действием суммарного напряжения σ_1 на выносливостное число цикла N_1^* . Усталостной кривой усталости (рис. 19), вычисленное в виде $\sigma_1^* \cdot N_1^* = C$, вытекает от напряжений σ_1 и числа циклов n_1 при равном рассмотрении режима работы к выносливостному σ_1 и N_1^* , если выносливость одной из последних выносливостей, например выносливостной σ_1 . Тогда для каждого стандартного режима с напряжениями σ_1 и циклическим профилем n_1 можно найти выносливостное число циклов на усталости

$$\sigma_1^* \cdot n_1 = \sigma_{1m}^* \cdot n_{1m}.$$

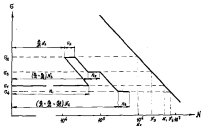


Рис. 18. Напряжения в ступенчатой детали при асимметричном нагружении

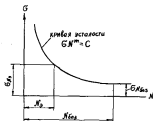


Рис. 19. Применение асимметричного режима нагружения к асимметричному напряжению в чашку шлица

формулы

$$N_{1,2} = n_2 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^m$$

Суммарное эквивалентное число циклов за срок службы детали вычисляют $N_{\Sigma} = \sum N_{1,2}$.

Предел вычисленной эквивалентности выводится соответственно суммарному эквивалентному числу циклов (см. рис. 18)

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\text{стат}} \sqrt[m]{\frac{N_{\Sigma}}{N_1}}$$

Коэффициент запаса прочности

$$n = \frac{\sigma_{\text{стат}}}{\sigma_{\Sigma}}$$

Пр и м е р. Деталь из закаленной стали эксплуатируется при несимметричном режиме. Напряжения вычислены по симметричной шкале и приведены к пределу выносливости. Выявлены напряжения в чашке шлица для статического режима, предельно допустимые:

σ_1 , кгс/см ²	1 600	1 900	2 300	2 600
N_1 , циклов	$5 \cdot 10^4$	10^4	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$

Предел текучести стали $\sigma_s = 4000$ кгс/см²; предел выносливости с учетом концентрации напряжений и масштаба эффекта $\sigma_{\Sigma} = 1900$ кгс/см², на базе $N_1 = 5 \cdot 10^4$ циклов; $m = 7$. Найти коэффициент запаса прочности.

Р е ш е н и е. За эквивалентное напряжение принимаем $\sigma_{\Sigma} = 1900$ кгс/см². Действующее в чашке сосредоточенное напряжение. Затем определяем эквивалентное число циклов в чашке шлица:

$$N_{10} = n_2 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{\Sigma}} \right)^m = 5 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{16}{19} \right)^7 = 0,22 \cdot 10^4 \text{ циклов};$$

$$N_{20} = n_2 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{\Sigma}} \right)^m = 10^4 \cdot \left(\frac{19}{19} \right)^7 = 0,16 \cdot 10^4 \text{ циклов};$$

$$\sigma_{22} = \sigma_1 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^2 = 5 \cdot 10^8 \left(\frac{40}{20} \right)^2 = 920 \cdot 10^8 \text{ цм/см}^2;$$

$$\sigma_{33} = 92 \cdot 10^8 \text{ цм/см}^2;$$

$$M_2 = (922 + 940 + 920 + 92) \cdot 10^8 = 993 \cdot 10^8 \text{ цм/см}^2$$

Находим через эквивалентное напряжение предельную величину деформации:

$$\sigma_{13} = \sigma_1 \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = 1500 \sqrt{\frac{993 \cdot 10^8}{92 \cdot 10^8}} = 5700 \text{ кг/см}^2$$

Коэффициент запаса прочности

$$n = \frac{\sigma_{13}}{\sigma_2} = \frac{5700}{1500} = 3,8.$$

Когда деталь, испытываемая при ограниченной ресурсе времени под действием произвольных высокочастотных напряжений, рассчитывается на долговечность по предельному числу циклов. Предполагаем, что задано статическое напряжение σ , превышающее предельную долговечность в предельное число циклов до разрушения M . На-на основе заданных размеров предельной долговечности, что предельного циклического напряжения, коэффициент запаса по долговечности K_d , рекомендуемый коэффициент не менее 10-20. При заданном сроке эксплуатации детали в течение L циклов условия долговечности представляются неравенством $K_d n \leq M$.

В случае многоскоростной работы нагружения детали при заданных уровнях эксплуатационных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ можно на эту характеристику применить соответствующие циклические пределы n_1, n_2, n_3, \dots и ввести относительное число циклов до разрушения M_1', M_2', M_3', \dots . В правой установке (см. рис. 18) $n_1 < M_1', n_2 < M_2', n_3 < M_3'$. Рассогласованность эквивалентности относительные долговечности $\frac{n_1}{M_1'} < 1, \frac{n_2}{M_2'} < 1,$

$\frac{n_3}{M_3'} < 1, \dots$ показавшим, что каждое из колебаний вычислений свидетельствует о возникновении усталостных повреждений в связи с циклическим действием напряжений. При заданных уровнях напряжений и их эксплуатационном чередовании в случайной последовательности, для практических расчетов удовлетворительная

ная картина дает линейное суммирование эквивалентных напряжений. Согласно рассмотренным соотношениям условия долговечности переменно-напряженной детали, при коэффициенте запаса $n_d > 1$, представляется неравенством

$$n_d \sum \frac{n_i}{M_i'} < 1.$$

Пример. Деталь работает при многоскоростной работе нагружении. Четыре уровня эксплуатационных напряжений соответствуют следующим эксплуатационным пределам n_i и предельным долговечностям M_i' :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 16 \text{ кг/см}^2, & n_1 &= 2 \cdot 10^8 \text{ циклов}, & M_1' &= 2 \cdot 10^8 \text{ циклов}; \\ \sigma_2 &= 10 \text{ кг/см}^2, & n_2 &= 1 \cdot 10^8 \text{ циклов}, & M_2' &= 7 \cdot 10^8 \text{ циклов}; \\ \sigma_3 &= 20 \text{ кг/см}^2, & n_3 &= 3 \cdot 10^8 \text{ циклов}, & M_3' &= 2 \cdot 10^8 \text{ циклов}; \\ \sigma_4 &= 30 \text{ кг/см}^2, & n_4 &= 10^8 \text{ циклов}, & M_4' &= 6 \cdot 10^8 \text{ циклов}. \end{aligned}$$

При коэффициенте запаса $K_d = 20$ проверить запас циклической долговечности.

Решение.

$$\begin{aligned} K_d \sum \frac{n_i}{M_i'} &= 20 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^8} + \frac{1 \cdot 10^8}{7 \cdot 10^8} + \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^8} + \frac{10^8}{6 \cdot 10^8} \right) = \\ &= 20 \cdot (10^2 + 0,7 \cdot 10^2 + 1,5 \cdot 10^2 + 1,6 \cdot 10^2) = 980 < 1. \end{aligned}$$

Условия долговечности удовлетворены.

В общем случае многоскоростное нагружение представляется не отдельными уровнями напряжений, а непрерывными распределениями эксплуатационных нагрузок в заданных или заданных для конструктивной работы материалах или видах и сообразной литературе. Аналитические решения, направленные на установление предельных долговечностей в случае случайной эксплуатации для случаев конструктивной в частности рассмотрены в 2.3. Вспомогательные и другие методы.

В заключение рассмотрим расчет общей надежности статически неопределяемой системы, показав, что при заданных значениях сил и предельное состояние может наступить от односторонней случайной деформации или от многосторонней истеро-напряженной нагрузки.

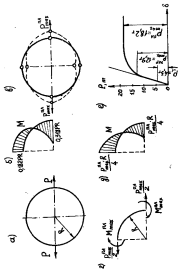


Рис. 20. Расчет несущей способности замкнутого кругового свода при сжатии в опорах при действии сосредоточенной нагрузки

Пример. Построим предельную собой замкнутое круговое кольцо радиусом $R = 1,5$ м, нагруженное диаметрально силой P (рис. 20, а). Материал — сталь в прочностном состоянии $\sigma_s = 3000$ кгс/см², по сечению $W_s = 203$ см², $J_s^{\text{зам}} = 114$ см⁴, предел текучести при работе стали в состоянии пластичности $\sigma_{\text{т}} = 1000$ кгс/см². Выяснить прочностные и эксплуатационные нагрузки.

1. Прочностные состояния определяются дробной текучести от максимальной нагрузки под действием односторонней случайной нагрузки.

Решение. Согласно общему решению, рассмотрим сферу изгибаемого момента, выделив 1/4 свода (см. рис. 20, д). Выделим элемент дробной текучести в сжатии отсюда $M_{\text{max}} = 0,318 P$, $P_{\text{max}}^{\text{пр}} \cdot R = \sigma_s \cdot W_s$, откуда предельная нагрузка $P_{\text{max}}^{\text{пр}} = \frac{\sigma_s W_s}{0,318 R} = \frac{3000 \cdot 203}{0,318 \cdot 150} = 12000$ кг = 12,0 т.

Коэффициент запаса прочности K приняв равным 1,5; эксплуатационная нагрузка $P_s = \frac{P_{\text{max}}^{\text{пр}}}{K} = \frac{12,0}{1,5} = 8,0$ т.

2. Прочностные состояния с точки зрения пластической деформации определяются угловой геометрической неизменяемостью формы кругового свода на образующих двух пар шарниров текучести (см. рис. 20, в) при изгибании моментов $M_{\text{max}} = \sigma_s \cdot 2 \cdot J_s^{\text{зам}}$ (см. рис. 20, в).

Решение. Условие равновесия 1/4 свода неизменяемости угловости $2M_{\text{max}} - \frac{E \sigma_s R}{2} = 0$, откуда $M_{\text{max}} = \frac{E \sigma_s R}{4}$, сфера изгибаемых моментов представлена на рис. 20, д. Предельная нагрузка $P_{\text{max}}^{\text{пр}} = \frac{4 \cdot M_{\text{max}}}{R} = \frac{8 \sigma_s \cdot J_s^{\text{зам}}}{R} = \frac{8 \cdot 3000 \cdot 114}{150} = 12000$ кг = 12,0 т. Эксплуатационная нагрузка

$$P_s = \frac{P_{\text{max}}^{\text{пр}}}{K} = \frac{12,0}{1,5} = 8,0 \text{ т.}$$

3. Прочностные состояния определяются разрушением от уст-

ности под действием несимметрично-антисимметричной силы P , с возмущением напряжений симметричного цикла.

Р е ш е н и е. Поскольку предел выносливости имеет предел текучести, то проводим расчет по формулам для упругого состояния. Условие прочности будет $M_{\Sigma} = 0,316 P_{\Sigma} R = \sigma_{\Sigma} W_{\Sigma}$,

$$\text{откуда } P_{\Sigma} = \frac{\sigma_{\Sigma} W_{\Sigma}}{0,316 R} = \frac{1000 \cdot 203}{0,316 \cdot 100} = 4300 \text{ кг} = 4,3 \text{ т.}$$

В случае упругого разрушения от усталости эффективное значение прочности уменьшается факт. $n > 2$; эквивалентная нагрузка $P_p = \frac{P}{n} = \frac{4,3}{2} = 2,15 \text{ т.}$

Для сравнения предельных нагрузок можно представить график или соотношения упруго-пластическому деформированию (см. рис. 20, а). График показывает, что предельная нагрузка $P_{\Sigma} = 4,3 \text{ т} < P_{\Sigma \text{ max}}^{\text{уп}} = 12,9 \text{ т} < P_{\Sigma \text{ max}}^{\text{пл}} = 18,2 \text{ т.}$

соответствуют с весьма значительной разницей нагрузке одностороннего и антисимметричного действия.

4. Предельное состояние определяется разрушением от усталости под действием несимметричной переменной силы нескольких уровней; на ограниченный цикл жизни возмущаются всевозможные напряжения симметричного цикла, произвольно предела выносливости. Эквивалентные нагрузки, выраженные в числа циклов заданы ниже.

Эквивалентная нагрузка, P	$1,2 P_{\Sigma}$	$1,1 P_{\Sigma}$	$1,05 P_{\Sigma}$
Число циклов, n	500	2000	5000
Напряжение, σ кгс/см ²	1200	1100	1050

Р е ш е н и е. Заданы кривой усталости $\sigma^m n^k = const$, константа $m = 8$; $N_{D_{\Sigma}} = 6 \cdot 10^6$ цикл.

Предельное эквивалентное напряжение

$$\sigma_p = \sigma_{\Sigma} = 1200 \text{ кгс/см}^2, \quad n_p = n_{\Sigma} = 500 = 40 \cdot 10^3 \text{ цикл.}$$

$$n_{D_{\Sigma}} = n_{\Sigma} \left(\frac{\sigma_{\Sigma}}{\sigma_p} \right)^m = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{1100}{1200} \right)^8 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

$$n_{D_{\Sigma}} = n_{\Sigma} \left(\frac{\sigma_{\Sigma}}{\sigma_p} \right)^m = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{1100}{1200} \right)^8 = 1,7 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

$$\text{Эквивалентное число циклов } N_{D_{\Sigma}} = n_{D_{\Sigma}} + n_{D_{\Sigma}} + n_{D_{\Sigma}} = 0,9 \cdot 10^6 + 1,0 \cdot 10^6 + 1,7 \cdot 10^6 = 3,6 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

Предельное эквивалентное напряжение по кривой усталости

$$\sigma_{D_{\Sigma}} = \sigma_{\Sigma} \sqrt[m]{\frac{n_{D_{\Sigma}}}{N_{D_{\Sigma}}}} = 1200 \cdot \sqrt[8]{\frac{3,6 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6}} = 2500 \text{ кгс/см}^2.$$

$$\text{Коэффициент запаса прочности } K = \frac{\sigma_{D_{\Sigma}}}{\sigma_p} = \frac{2500}{1200} = 2,1.$$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. КАРИНСКО Г.Б. Влияние атмосферной среды на коррозионность стали. Изд-во АР ЮФР, 1968.
2. ЦИРИАН Л.А. Коррозионно-усталостная прочность металлов. Наука, 1968.
3. КАРИНСКО Г.Б. Прочность стали в коррозионной среде. Наука, 1968.
4. РОМАНОВ В.В. Влияние коррозионной среды на динамическую прочность металлов. "Наука", 1968.
5. ДИМИТРИЙ В.А. Детали машин. "Судостроение", 1970.
6. КИРИАН Л.А. Нерациональные методы строительства мостовых кранов. "Судостроение", 1966.
7. КИРИАН Л.А., ПАСХА Е.А., ХИДИМИДИНА Л.Ф. Динамическая прочность судостроительных стальных. "Судостроение", 1968.
8. ВОЙТЧЕВ П. Усталость металлов. "Машиностроение", 1968.
9. Сб. "Усталость и коррозионность металлов" под ред. Г.Б.Каринского, М., 1963.
10. КИРИАН Л.А. Вязучность и усталость в металлах. "Металлургия", 1965.
11. КИРИАН Л.А. Механические свойства металлов, ч.1 и 2. Изд. АСМ, 1970.
12. КИРИАН Л.А. Циклическая прочность металловых конструкций. Изд. АСМ, 1972.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Предисловие	3
Глава I. Кинетика образования и распространения трещин усталости	4
§ 1. Условия образования и распространения трещин усталости	4
§ 2. Особенности распространения трещин усталости	7
§ 3. Неравномерное развитие трещины усталости	8
§ 4. Скорость распространения трещин усталости	11
§ 5. Влияние внешнего режима возбуждения коррозионно-рассеиваемой на распространение трещин усталости	13
§ 6. Распространение трещин усталости в условиях нестационарного нагружения	15
§ 7. Скорость роста трещин усталости в связи со статистическим анализом свойств стали: влияние температуры окружающей среды и частоты цикла на скорость роста трещин усталости	17
§ 8. Влияние температуры окружающей среды и частоты цикла на скорость роста трещин усталости	19
Глава II. Коррозионная усталость металлов	21
§ 9. Агрегированная и структурная усталость в локализованных коррозионной усталости	21
§ 10. Природа и механизмы коррозионной усталости	29
§ 11. Влияние некоторых факторов на коррозионную усталость	30
§ 12. Коррозионно-усталостная прочность в связи с влиянием напряжений и деформированного состояния	35
§ 13. Коррозионно-усталостная прочность неравновесных сталей в циклах	37
§ 14. Методы защиты от коррозионной усталости	48

Глава II. Статистическая обработка экспериментальных данных	41
§ 16. Методика статистической обработки результатов разностных испытаний	41
Глава III. Применение экспериментальных данных к расчету переменного-напряженного состояния.....	47
§ 16. Кривые усталости и их значение для прочностных расчетов	47
§ 17. Предложения по расчету прочности переменного-напряженного состояния	49
Литература	64