

НИУ МЭИ

ЭНМИ

Кафедра теоретической механики и мехатроники.

**Обзор литературы магистерской работы на тему:
«Усталостное разрушение материала»**

Научн. руководитель проф. Кирсанов М.Н.

Студент: Кутаев А.Н.

Группа: С-11-07.

Москва

2012 год

Введение

Усталостное разрушение является важной главой в таких разделах науки, как материаловедение и сопротивление материалов. Также неотъемлемой частью являются расчеты предельной прочности и выносливости материалов в машиностроении, особенно в самолетостроении.

Для начала дадим основные определения, что же все-таки такое усталостное разрушение и остальные термины, которые будут использованы.

Усталостное разрушение – это механизм разрушения материала под действием переменной (часто циклической) нагрузки. Существует множество причин усталостного разрушения, но основной является образование и дальнейшее развитие трещин в поперечных сечениях.

Сам механизм усталостного разрушения связан с неоднородностью структуры материалов, таких как различие форм и размеров, наличие примесей и шлаков в материале, дефекты кристаллической решетки, царапины, коррозия и другое. В связи с неоднородностью, указанной выше, при переменных нагрузках возникает концентрация напряжений, которая приводит к деформациям некоторых зерен металла и появлению сдвигов. Далее происходит развитие этих сдвигов и, как следствие, появление микротрещин, которые интенсивно разрастаются. При росте трещины поперечное сечение детали ослабляется и происходит хрупкое разрушение детали. Этот процесс называется усталостью материала. Обратное же свойство материала называется выносливостью.

Выносливость – это свойство материала сопротивляться разрушению и образованию трещин при переменной нагрузке за указанное время. Выносливость связана с прочностью материала, а также сильно зависит от температуры. Также выносливость по определению схожа усталостной прочностью материала, которая зависит от числа циклов, величины действующей нагрузки и амплитуды напряжений.

Выносливость может быть измерена. Основной характеристикой является предел выносливости. Предел выносливости – это наибольшее предельное значение напряжения цикла, при котором не происходит усталостное разрушение за произвольно большое число циклов. Привычное обозначение предела выносливости σ_r , где r – коэффициент асимметрии цикла. В таких металлах как железо и титан не сложно опытным путем установить величину максимального напряжения. Другие же металлы, например медь и алюминий подвержены усталостным разрушениям даже при малых величинах максимального напряжения. Для таких случаев было предложено использовать ограниченный предел выносливости - $\sigma_{гп}$. Обычно он находится в пределах 10^6 - 10^8 циклов. Опытным путем было найдена зависимость предела выносливости от предела прочности (механическое напряжение σ_B выше которого происходит разрушение материала). Установлено, что для сталей при изгибе:

$$\sigma_{-1} \approx 0,4 \dots 0,5 \sigma_B \quad - \text{ для цветных металлов}$$

$$\sigma_{-1} \approx 0,25 \dots 0,5 \sigma_B$$

- высокопрочные стали

- углепластик

$$\sigma_{-1} \approx 400 + \frac{1}{6} \sigma_B$$

$$\sigma_{-1} \approx 0,8 \sigma_B$$

При кручении $\tau_{-1} \approx 0,6 \sigma_{-1}$

При растяжении-сжатии примерно на 10-20% меньше чем при изгибе. [1]

Данными соотношениями следует пользоваться с осторожностью, так как они получены при определенных режимах нагрузки. Здесь же они представлены для наглядности зависимости предельной выносливости с предельной прочностью.

Катастрофы, связанные с усталостью материала

С усталостью материала связано немало крупных катастроф.

Версальская железнодорожная катастрофа, произошедшая 8 мая 1842 года, унесшая жизни более 50 человек. Причиной ее, по исследованиям шотландского инженера Уильяма Джона Ранкина, стала хрупкость металла по всему сечению осей колесных пар.

Затопление Бостона патокой случилось 15 января 1919 года. На алкогольном заводе *Purity Distilling Company* в переполненном резервуаре с 8700 м³ патоки из-за усталости металла разошлись соединенные заклепками листы металла. Жидкость пронеслась по городу со скоростью 600 км/ч. Жертвами стали 21 человек, еще 150 человек попало в больницы

Крушения самолетов *De Havilland Comet*. Интенсивные тесты, проведенные после череды аварий, показали, что их причиной была технология крепления квадратных иллюминаторов методом клёпки. Уже на стадии изготовления самолёта заклепки могли нарушить структуру материала на микроскопическом уровне, в результате возникала микроскопическая трещина, которая со временем (и числом полетов) увеличивалась и, в конце концов, приводила к разрушению всего фюзеляжа

Авиакатастрофа под Харьковом 18 мая 1972 года. Катастрофа самолета Ан-10А. Причиной катастрофы стало разрушение центроплана крыла в воздухе из-за разрыва нижней панели центроплана, вызванного усталостными трещинами стрингеров и обшивки. Погибло 122 человека.

Авиакатастрофа в Амстердаме 4 октября 1992 года. Падение самолета Боинг 747. Обломалось крепление внутреннего, третьего двигателя, правый двигатель оторвался от крыла 10 метров кромки. Самолет врезался в шестиэтажное здание. 47 погибших.

Железнодорожное крушение под Эшеде 3 июня 1998 года. От переменной нагрузки лопнул бандаж колеса, высокоскоростной поезд сошел с рельсов и врезался в мост. 101 жертва.

Небезызвестная Саяно-Шушенская ГЭС. 17 августа 2009 года. Многократное возникновение дополнительных нагрузок переменного характера на 2ой гидроагрегат, связанное с переходами через нерекомендуемую зону работы агрегата, из-за чего образовались усталостные повреждения узлов гидроагрегата и крышки турбины. Вызванные динамическими нагрузками разрушения привели к срыву крышки турбины и разгерметизации водоподводящего тракта гидроагрегата.

Данные происшествия наглядно показывают важность всестороннего изучения усталостных характеристик материалов, используемых в машиностроении. Даты происшествий позволяют заключить то, что вопрос усталости материалов изучен не в полной объеме. При появлении новых материалов и сплавов необходимы расчеты на прочность, прежде чем новшество будет применено в машиностроении.

Цель работы:

1. Изучение методов исследования усталостных разрушений.
2. Составление расчетной модели изнашивания материала и получение его усталостных параметров.
3. Получение экспериментальных данных и сравнение их с расчетной моделью.

Обзор литературы

Первооткрывателем в вопросе усталости металла был Вильгельм Альберт. Сам же термин «усталость» ввел в 1839 году Жан-Виктор Понселе – французский математик и инженер. В то время еще не было известно, что разрушение материала под действие переменной нагрузки связано с образованием трещин, поэтому был введен термин «усталость», который не совсем точен, но устойчиво закрепился при описании данного явления.

Наибольший вклад в основу вопроса выносливости материалов внес немецкий инженер Август Вёллер своими опытами с железом и сталью в условиях переменных растяжений-сжатий, результаты которых были опубликованы в 1858-1870 годах. Немецкий архитектор и художник Льюис Шпангенберг графически изобразил результаты этих исследований. С тех пор графическое представление зависимости переменной нагрузки от числа циклов называется кривой Вёллера.

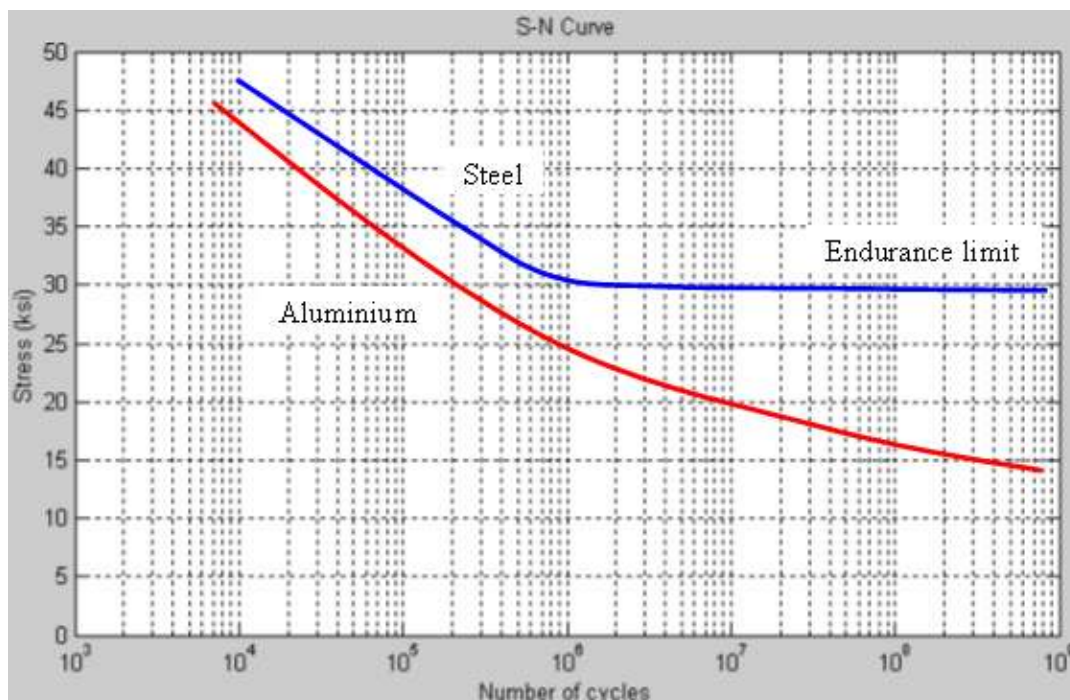


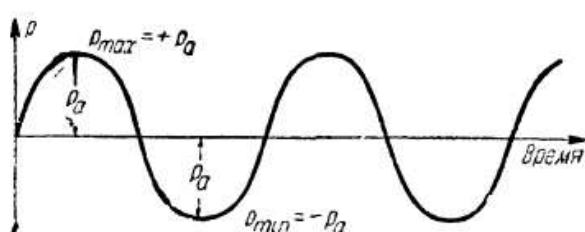
Рис.1 Кривая Вёллера. Синяя кривая показывает зависимость переменной нагрузки по модулю от числа циклов для обычной стали. Место, где кривая принимает вид почти горизонтальной прямой и есть предел выносливости для данного металла. Красная кривая показывает ту же зависимость для алюминия. Как видно из графика, кривая не стремится к горизонтальной прямой, что характеризует алюминий как металл подверженный усталостным разрушениям даже при малых величинах максимального напряжения

Исследование в области усталости материалов действию переменных нагрузок с самого начала пошло исключительно экспериментальным путем.

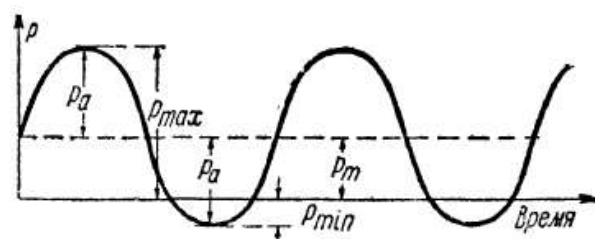
В нашей стране впервые этим вопросом занялись Воропаев и Симинский. В Киевском Политехническом Институте были поставлены опыты по усталости мостового железа в 1920-1922 годах. В ленинградском институте инженеров путей и сообщения, начиная с 1925 года, велись работы по борьбе с изломами от усталости деталей подвижного состава железных дорог. Там же Н.М. Беляевым была проведена большая работа по изучению динамической прочности рельсовой стали. И.А. Одинг проделал ряд работ по изучению причин возникновения явления усталости при повторно-переменных напряжениях. Им же была предложена новая теория усталостного разрушения металлов (теория гистерезисной энергии).

Применение экспериментальных данных для расчетов деталей машин при переменных напряжениях началось примерно с 1930г. Например С.В. Серенсену принадлежат работы, связанные с установлением критерия прочности и развитием методов определения запасов прочности деталей при переменный нагрузках. И.В. Подзолу – работы по усовершенствованию методики назначения допускаемых напряжений [2]

Беляев в своей книге «Сопротивление материалов»[2] дает основные понятия из усталости материала. Также он описывает принципы определения предела выносливости при симметричном и несимметричном цикле.



Фиг. 613.



Фиг. 614.

Если мы добавим к симметрично колеблющемуся в пределах $\pm p_a$ и $-p_a$ напряжению ещё напряжение постоянной величины p_m (фиг. 614), то получим случай *несимметричного* цикла; в этом случае предел выносливости оказывается выше, чем для симметричного цикла.

Крайние значения напряжения при несимметричном цикле p_{\max} и p_{\min} будут (фиг. 614):

$$p_{\max} = p_m + p_a \quad \text{и} \quad p_{\min} = p_m - p_a;$$

в свою очередь,

$$p_m = \frac{p_{\max} + p_{\min}}{2} \quad \text{и} \quad p_a = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{2}.$$

Напряжение p_m называют средним напряжением цикла, а p_a — амплитудой колебаний напряжения цикла. Отношение $r = \frac{p_{\min}}{p_{\max}}$ называется *характеристикой цикла*. При симметричном цикле $p_m = 0$, $p_{\min} = -p_{\max}$ и $r = -1$; при постоянном статическом напряжении $p_a = 0$, $p_{\min} = p_{\max}$ и $r = +1$; если $p_{\min} = 0$, то и $r = 0$.

Приведём несколько примеров несимметричных циклов:

$$\begin{aligned} \text{а) } & \left. \begin{aligned} p_{\max} &= + 800 \text{ кг/см}^2 \\ p_{\min} &= - 400 \text{ кг/см}^2 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} p_m &= 200 \text{ кг/см}^2 \\ p_a &= 600 \text{ кг/см}^2 \end{aligned} \right\} r = - 0,5, \\ \text{б) } & \left. \begin{aligned} p_{\max} &= + 1000 \text{ кг/см}^2 \\ p_{\min} &= + 300 \text{ кг/см}^2 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} p_m &= 650 \text{ кг/см}^2 \\ p_a &= 350 \text{ кг/см}^2 \end{aligned} \right\} r = + 0,3. \end{aligned}$$

Удвоенная величина амплитуды колебаний напряжения p_a

$$p_{\max} - p_{\min} = 2p_a$$

Наибольший интерес представляет определение величины предела выносливости при симметричном ($p_m = 0$) цикле, как наименьшего. Эта величина оказывается различной для случая деформации изгиба, осевой деформации (растяжение и сжатие) и кручения.

Для определения предела выносливости при изгибе применяются машины, в которых образец круглого поперечного сечения нагружается через шарикоподшипники, или как консоль — силой на конце, или как шарнирно-опёртая балка — симметрично расположенными равными силами; образец вращается со скоростью около 2000—3000 об/мин. При каждом обороте материал образца в наиболее напряжённых местах испытывает симметричный цикл изменения напряжений от наибольшего сжатия до такого же наибольшего растяжения, и обратно. Число циклов, испытанных образцом, определяется числом его оборотов N , отмечаемым специальным счётчиком¹⁾.

Также автор показывает следующие результаты:

Таким образом, для стали при симметричном цикле

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{-1}^H &= 0,40\sigma_B, \\ \sigma_{-1}^0 &= 0,7\sigma_{-1}^H = 0,28\sigma_B, \\ \tau_{-1}^K &= 0,55\sigma_{-1}^H = 0,22\sigma_B. \end{aligned} \right\} \quad (37.1)$$

Эти данные и могут быть положены в основу расчётных формул при проверке прочности.

Для цветных металлов мы имеем менее устойчивое соотношение между пределом выносливости и пределом прочности; опыты дают

$$\sigma_{-1}^H = (0,24 \div 0,50) \sigma_B.$$

При несимметричном цикле

$$P_{ra} = P_{-1} \left[1 - n_1 \frac{P_{rm}}{P_B} - n_2 \left(\frac{P_{rm}}{P_B} \right)^2 \right]. \quad (37.2)$$

Коэффициенты n_1 и n_2 имеют различные числовые значения зависимости от рода материала.

Посмотрим, какие продвижения в вопросе усталостного разрушения были достигнуты за последнее время.

В выпуске №3 за 2009 Вестника Самарского государственного аэрокосмического университета [3], была опубликована статья Н. В. Туманова и других соавторов «Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном циклах нагружения».

Были разработаны фрактографический и расчетный методы моделирования кинетики трещин малоциклового усталости при простом и сложном циклах нагружения. Методы применены для прогнозирования периода устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей и верификации прогноза. Показано, что расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Установлена

воспроизводимость продолжительности устойчивого роста однотипных трещин в разных дисках одной и той же конструкции при одинаковых условиях нагружения, что обеспечивает возможность надежного детерминированного прогнозирования.[3]

В Работе [4] В.Е. Стрижиуса, автор были представлены основные положения методов, которые могут быть использованы при инженерных расчетах на усталость типовых элементов авиаконструкций из полимерных композитных материалов. Также были выведены уравнения кривых усталости типовых элементов из ПКМ.

Таблица 2

Уравнения кривых усталости типовых элементов из ПКМ[4]

№№ п/п	Типовой элемент	Уравнение кривой усталости
1	Элементы со свободными отверстиями	$\lg N = \sigma_a \times m + c$
2	Элементы с заполненными (ненагруженными) отверстиями	$\lg N = \sigma_a \times m + c$
3	Обшивки из ПКМ с моделированием ударных повреждений	$\lg N = \sigma_a \times m + c$
4	Элементы со свободными кромками с моделированием расслоения ПКМ	$\lg N = \sigma_a \times m + c$
5	Срезные болтовые соединения	$\lg N = \sigma_{a\text{ см}} \times m + c$
6	Стыковые соединения, работающие на отрыв	$\lg N = \bar{q} \times m + c$

Также интерес представляет работа Б.А. Чичикова «РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ АВИАЦИОННЫХ ГТД. Часть 1. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК»[5].

В работе автор рассматривает основные общие вопросы эксплуатационной повреждаемости рабочих лопаток (в том числе и усталость материалов) и ее влияния на характеристики двигателей. Также вопросы контроля работоспособности и ремонта и замены рабочих лопаток. Автор описал, что «обычная усталость» в меньшей степени влияет на повреждаемость материалов, по сравнению с коррозией и повреждением забоинами. В свою очередь эти два явления также оказывают влияние на прочность металла, а следовательно и на усталость в целом.

Предел выносливости поврежденных стальных лопаток может снижаться до 200 МПа. Предел выносливости поврежденных титановых лопаток может снижаться с 270-520 МПа до 100 МПа. Наиболее чувствительны к повреждениям лопатки из титановых сплавов, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке. [5]

В работе Н.Г. Буранго и соавторов «Исследование альтернативных режимов усталостного разрушения диска компрессора газотурбинного двигателя» [6] были рассмотрены две задачи, одна связана с малоцикловой усталостью, другая на гигацикловой. Зоны зарождения усталостного разрушения в обоих случаях малоцикловой и гигацикловой усталости близко расположены и приблизительно совпадают с наблюдаемыми при эксплуатации. Это указывает на альтернативный характер возможных механизмов усталостного разрушения рассмотренного типового элемента компрессора [6].

В своей работе [7] М.Н. Фомин получил следующие результаты: Исследована возможность применения модели МПС (Механики поврежденной среды) для расчета процессов накопления усталостных повреждений в материалах и конструкциях при малоцикловом нагружении. Для ряда конструкционных материалов: сталей 08X18H10T, 12X18H10T, 40X16H9Г2С; Стали 45; сплава «Инконель 718»; Стали 304; алюминия 2024-T4 и др. получены материальные параметры модели МПС, описывающей ряд специфических и малоизученных эффектов [7]

Большое количество новых методов исследования кинетики усталостного разрушения приведены в работе [8] И.Д. Ибатулина. Описаны физические механизмы развития усталости и кинетика роста внутренней энергии в деформируемых материалах. Изложены существующие и предложены новые расчетные модели изнашивания, методики и технические средства для оценки их параметров.

Список литературы

1. <http://ru.wikipedia.org> Предел выносливости
2. Н.М. Беляев. Соппротивление материалов. Изд. Четырнадцатое. Изд-во «Наука» главная редакция физико-математической литературы Москва 1965.С.726-771.
3. Н. В. Туманов, М. А. Лаврентьева, С. А. Черкасова, А. Н. Серветник. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном циклах нагружения. Вестник Самарского государственного университета, №3(19), 2009. С.188-199.
4. В.Е. Стрижиус. Основные положения методов расчета Усталостной долговечности элементов Авиаконструкций из ПКМ. ООО «Прогрестех». г. Москва.
5. Б.А. Чичиков. «РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ АВИАЦИОННЫХ ГТД. Часть 1. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ЛОПАТОК». Московский государственный технический университет гражданской авиации. Москва. 73 с.
6. Н.Г. Буранго, А.Б. Журавлев, И.С.Никитин. Исследование альтернативных режимов усталостного разрушения диска компрессора газотурбинного двигателя. Москва, ИПМех РАН им. А.Ю.Ишлинского. 2009-2012гг.
7. Фомин М. Н. ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ НА БАЗЕ УРАВНЕНИЙ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ СРЕДЫ. Автореферат. Н. Новгород – 2011.
8. И.Д. ИБАТУЛЛИН. КИНЕТИКА УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ. Самарский государственный технический университет. Самара - 2008г. 396 с.