

**ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И
РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ
ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ**

Учебное пособие

Учебное пособие предназначено для самостоятельного изучения данного раздела курса “Сопротивление материалов” студентами машиностроительных специальностей (в том числе – при дистанционном обучении), а также для интенсификации и повышения качества индивидуальной работы студента в технически оснащенных аудиториях (телевизионных, компьютерных, с видеостенкой и кодоскопом).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
I. МНОГОЦИКЛОВОЕ УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ	6
1. ЯВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ	6
2. ЦИКЛЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ	9
3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ	18
4. РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	46
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО РАЗДЕЛУ “МНОГОЦИКЛОВОЕ УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ”	48
II. ПОНЯТИЕ О МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ	49
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВТОРНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	51
2. ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА МАЛОЦИКЛО ВУЮ УСТАЛОСТЬ	57
3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ. КРИТЕРИИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В ЖЕСТКОМ ЦИКЛЕ	61
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	64
5. РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ МАЛОЦИКЛО ВОМ НАГРУЖЕНИИ	67
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	72
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО РАЗДЕЛУ “ПОНЯТИЕ О МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ”	73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прочность материалов и конструкций при повторных нагрузениях – обширный и чрезвычайно важный для практики раздел современной науки о прочности. Сложный и многофакторный характер процессов разрушения, их зависимость от истории нагружения, разнообразие явлений, приводящих к образованию и развитию трещин обусловили широкое использование феноменологического подхода с дифференциацией методов расчета по крупным группам явлений. Раздельно рассматриваются многоцикловая усталость, при которой трещины развиваются на фоне упругого деформирования конструкции в целом, и малоцикловая усталость, связанная с повторным пластическим деформированием части конструкции.

В соответствии с государственным стандартом (ГОСТ 23207-78 "Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения") усталостью называют процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящих к изменению его свойств, образованию и развитию трещин и разрушению.

Различают две основные разновидности усталостного повреждения:

1. *малоцикловая усталость* возникает при максимальных напряжениях, превышающих предел текучести материала, и сопровождается знакопеременным пластическим деформированием объема материала, большого по сравнению с размерами структурных составляющих (зерен, пор, включений). Число циклов до образования заметной трещины (длиной 0,5 – 1 мм и более) зависит в основном от величины пластической деформации детали в каждом цикле и от способности материала сопротивляться малоцикловому разрушению; для стальных конструкций оно не превышает 10^4 . Явление малоциклового усталости знакомо каждому, кто ломал проволоку, пластически деформируя ее в разные стороны.

2. *многоцикловая усталость* имеет место при напряжениях значительно ниже предела текучести ($\sigma_{\max} < 0,6\sigma_T$). В этом случае в макрообъеме материал деформируется упруго (его свойства с вполне удовлетворительной точностью описываются законом Гука $\sigma = E\varepsilon$). Однако большинство реальных материалов имеют сложную многокомпонентную структуру (зерна, поры, межзеренные прослойки, неметаллические включения в стали и т. д.). При упругом деформировании достаточно

большого объема в микрообъемах (в отдельных слабых зернах, вблизи дефектов) происходит локальное знакопеременное пластическое деформирование, которое называют микропластическим. Его многократное повторение приводит к зарождению микроскопических трещин. Постепенное их развитие и слияние в магистральную трещину приводит к ослаблению сечений и затем к внезапному долому деталей. Продолжительность стадии многоциклового усталости к моменту зарождения магистральной усталостной макротрещины для стальных конструкций превышает $10^5 - 10^6$ циклов.

Граница между малоциклового и многоциклового усталостью не является четко выраженной. В тех случаях, когда пластическая деформация в макрообъеме отлична от нуля в каждом цикле, но мала по сравнению с упругой, условия зарождения трещины зависят и от упругой и от пластической деформации. Это – переходная зона между малоциклового и многоциклового усталостью.

Данное пособие предназначено для студентов машиностроительных специальностей и ограничено основными понятиями, связанными с прочностью материалов и конструкций при циклическом нагружении в условиях нормальных температур, т.е. без учета температурно-временной зависимости свойств материалов.

Этот раздел курса “Сопротивление материалов” в соответствии с существующими программами и учебными планами изучается последним и, как правило, не сопровождается практическими и лабораторными работами. Поэтому в этом разделе курса отличие практических занятий от лекций не акцентируется и отсутствуют задачи для самостоятельного решения, даны лишь вопросы для самопроверки и экзаменационные вопросы прошлых лет.

I. МНОГОЦИКЛОВОЕ УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ

1. ЯВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Ответственные детали большинства машин при эксплуатации подвергаются действию циклически изменяющихся во времени напряжений, что создает условия для возникновения особого вида разрушения,

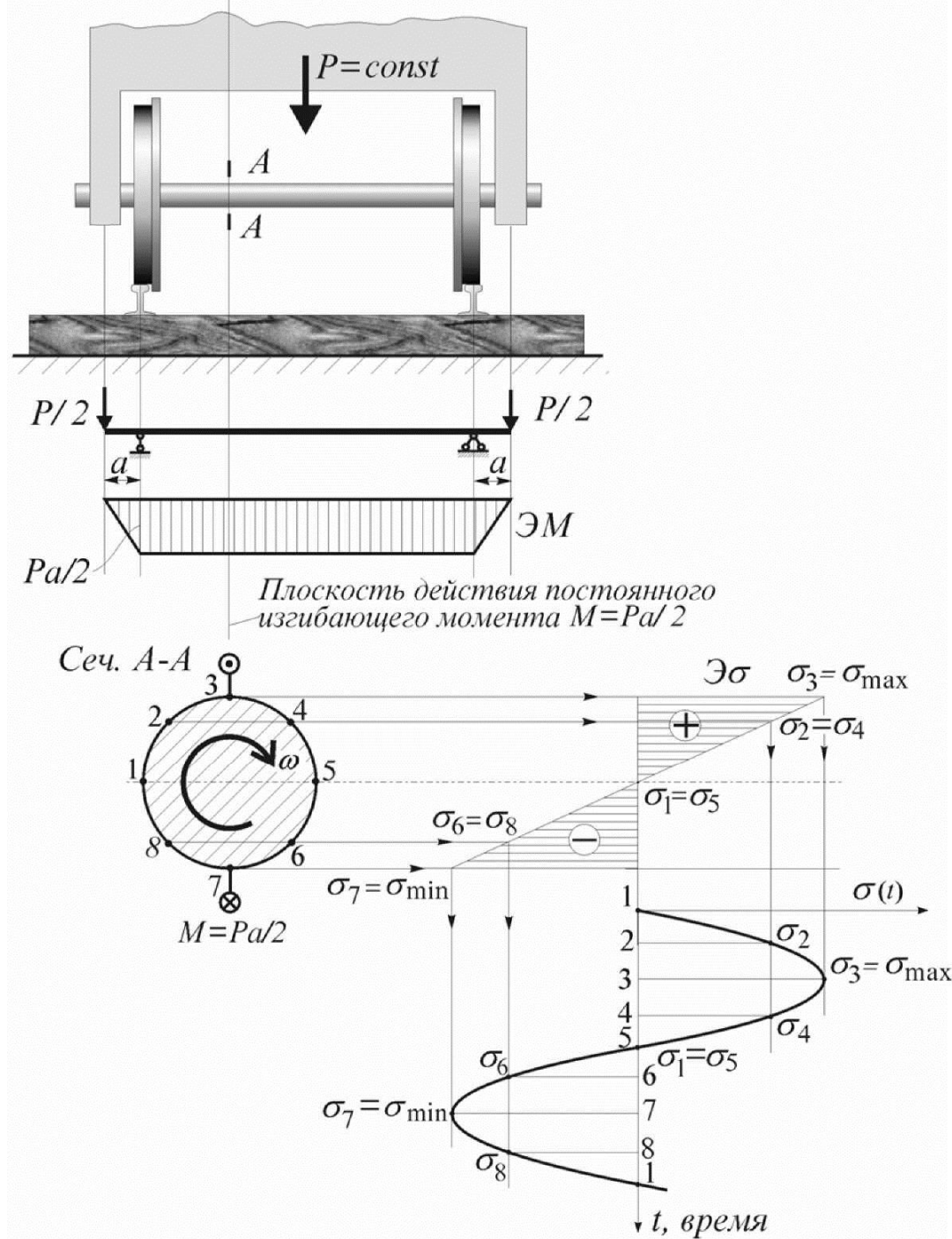


Рис. 1

называемого **усталостью**. Способность сопротивляться действию переменных напряжений называют **выносливостью** материала.

Механизм возникновения переменных во времени напряжений обсудим на известном примере нагружения оси железнодорожного вагона. Вначале рассмотрим случай, когда вагон неподвижен. На рис. 1 показаны обусловленные действием силы тяжести P эпюры изгибающего момента и нормальных напряжений в сечениях среднего участка оси. При движении вагона по ровному участку пути, когда колебания его корпуса отсутствуют и внешние силы остаются неизменными, вращение осей приводит к изменению положения точек на поверхности сечений по отношению к плоскости действия постоянного изгибающего момента $M=Pa/2$ (на рис.1 цифрами 1...8 показаны различные положения **одной из точек** на поверхности сечения).

Таким образом, за время одного оборота колеса в каждой точке поверхности оси железнодорожного вагона напряжения изменяются во времени по гармоническому закону $\sigma(t)$, проходя нулевые значения (положения точки 1 и 5) и достигая максимальных значений растягивающих и сжимающих напряжений (положения точки 3 и 7 соответственно). Частота изменения напряжений определяется скоростью движения поезда.

Легко убедиться в том, что во время одного рейса поезда дальнего следования Москва-Владивосток-Москва описанный цикл изменения напряжений в осях вагонов повторяется более пяти миллионов раз.

В результате многократного нагружения, как отмечалось в предисловии, в отдельных ослабленных микрообъемах конструкции развивается локальное знакопеременное неупругое деформирование, приводящее к появлению микротрещин. Их развитие и слияние приводит к появлению макротрещины, размеры которой затем постоянно увеличиваются с ростом числа нагружений: вначале медленно, затем все быстрее. Когда трещина достигает критической длины, происходит практически мгновенный долом.

Усталостный излом деталей имеет характерный вид, позволяющий отличать его от разрушений при других видах нагружений (рис. 2). Основные признаки многоциклового излома:

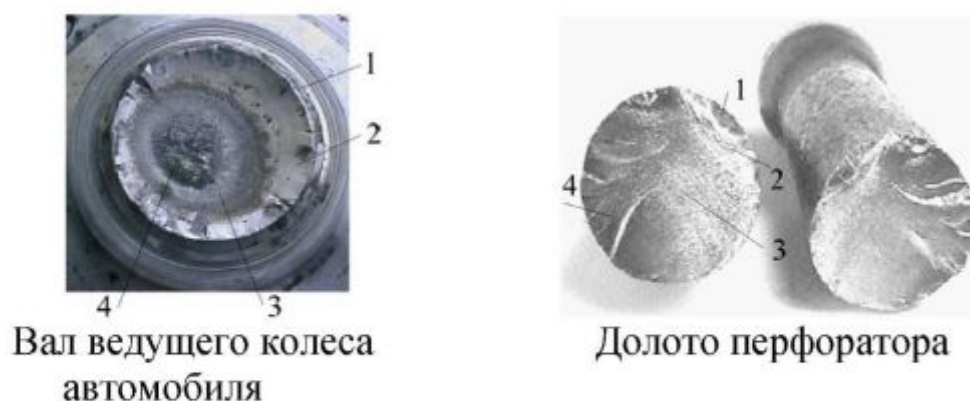


Рис. 2

1 – очаг зарождения усталостного повреждения, нередко здесь можно заметить небольшой дефект, с которого начинается развитие трещины – раковину, неметаллическое включение, царапину или забоину;

2 – зона постепенного продвижения трещины, для которой характерна гладкая блестящая поверхность как результат длительного при-тирания поверхностей;

3 – зона ускоренного развития трещины;

4 – зона долома; она имеет зернистую поверхность, характерную для хрупкого разрушения от статической нагрузки.

Локальные процессы зарождения и первоначального развития трещины не оказывают заметного влияния на деформирование детали в целом, а ускоренное развитие трещины, как правило, непродолжительно. В результате долом часто происходит внезапно и становится причиной аварийных ситуаций. Более половины всех разрушений технических устройств связано с разрушением от многоциклового усталости. Отсюда ясно, насколько актуальными являются задачи изучения поведения материалов при циклическом нагружении и разработки методов расчета, обеспечивающих предотвращение усталостных разрушений конструкций в эксплуатации.

Различным этапам процесса усталостного разрушения отвечают различные методы расчета. Вначале в качестве предельного состояния принимается образование магистральной трещины длиной 0,1...0,5 мм, т.е. анализ ограничивается начальной стадией усталостного разрушения. Целью расчета является определение условий зарождения макро-трещины: установление связи между условиями нагружения и свойствами материала при достижении предельного состояния.

Следующим этапом процесса является постепенное развитие трещины (этап живучести). Целью расчетов на этом этапе является обычно установление размеров трещины в зависимости от числа циклов нагружения и определение условий, при которых происходит долом. Соответствующие расчеты ведутся методами механики разрушения.

Ниже в этом пособии рассматривается только этап зарождения макротрещины, анализ живучести конструкций с трещинами выходит за рамки данного учебного курса.

2. ЦИКЛЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Методики лабораторных исследований усталостной прочности регламентированы ГОСТ 25.502–79 "Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость".

2.1. Виды циклов напряжений

Рассмотрим наиболее часто встречающийся на практике случай гармонического изменения напряжений во времени.

Отдельный цикл соответствует одному периоду изменения напряжений и характеризуется следующими параметрами (рис. 3):

$\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ – наибольшее и наименьшее по алгебраической величине напряжения;

σ_m – среднее значение напряжений цикла;

σ_a – амплитуда напряжений.

Очевидно, что:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \begin{cases} > 0; \\ < 0; \end{cases}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} > 0.$$

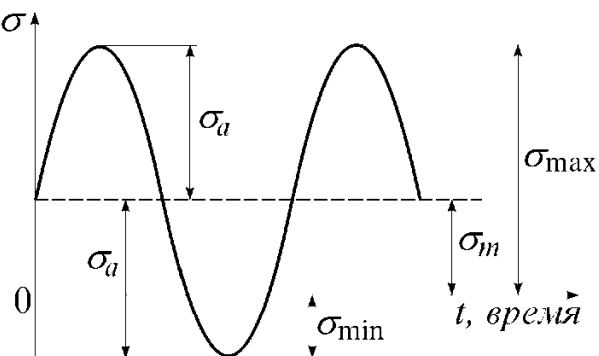


Рис.3

Симметричным называют цикл, в котором средние напряжения равны нулю ($\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \sigma_{\max} = |\sigma_{\min}|$). Пульсационным (отнулевым) называют цикл, в котором или максимальное, или минимальное напряжение равно нулю:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= 0, & \sigma_a &= \sigma_m = |0,5\sigma_{\min}|; \\ \sigma_{\min} &= 0, & \sigma_a &= \sigma_m = |0,5\sigma_{\max}|.\end{aligned}$$

Для характеристики степени отклонения произвольного цикла от симметричного вводят коэффициент асимметрии:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}.$$

Для симметричного цикла $R = -1$. Разнообразие циклов напряжений показано на рис.4(а).

Поскольку появление усталостных трещин связано с действием

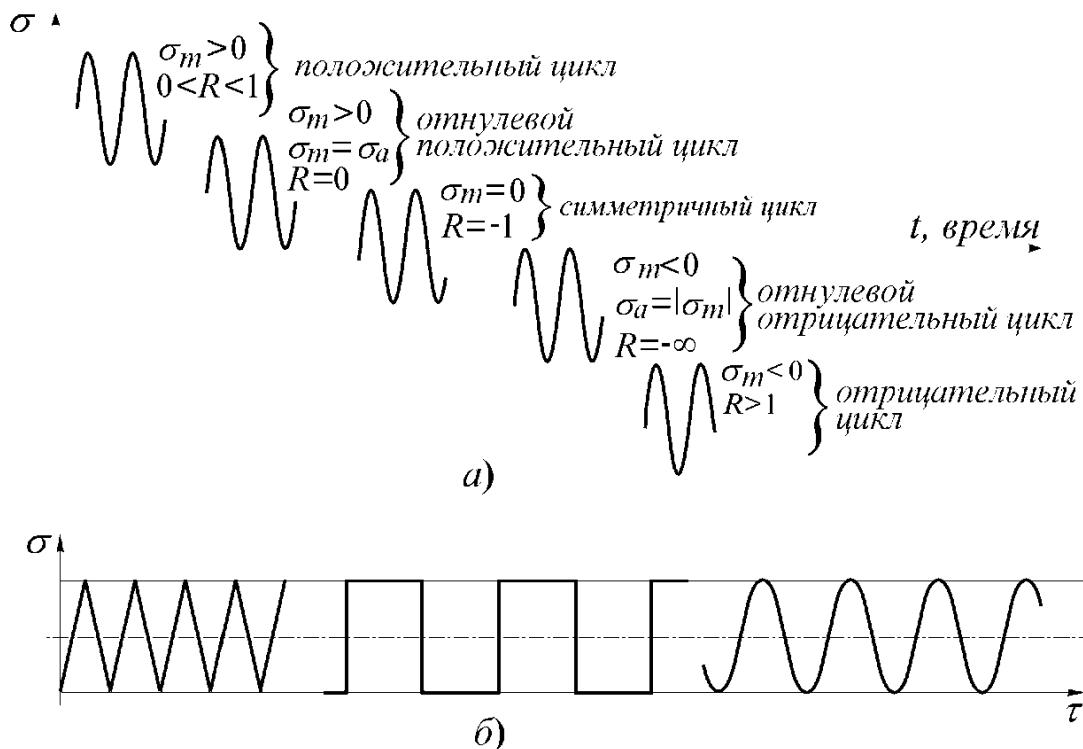


Рис. 4

пластических деформаций (в микрообъеме), форма и частота цикла (рис.4б) при нормальных температурах не влияют на зарождение трещин. При повышенных температурах, приводящих к ползучести, влияние этих факторов может быть существенным.

2.2.Образцы и машины для стандартных испытаний

Форма и размеры образцов, предназначенных для определения характеристик выносливости различных металлов и сплавов, регла

ментированы ГОСТ–25.502–79. Образцы состоят из рабочей части и утолщенных головок, предназначенных для закрепления образцов в захватах испытательных машин. Рабочая часть образцов представляет собой стержень круглого ($d = 5 \dots 25$ мм) или прямоугольного (толщина $h = 3 \dots 10$ мм, ширина $b = 15 \dots 30$ мм) сечений с полированной поверхностью (рис.5).

Для усталостных испытаний применяются испытательные машины с механическим, гидравлическим, электромагнитным или пневматическим возбуждением, предназначенные для нагружения образцов растяжением-сжатием, изгибом или кручением при различных температурах в различных средах.

Наибольшее распространение получили испытания при изгибе, поскольку они могут быть выполнены на сравнительно простых и мало-мощных машинах.

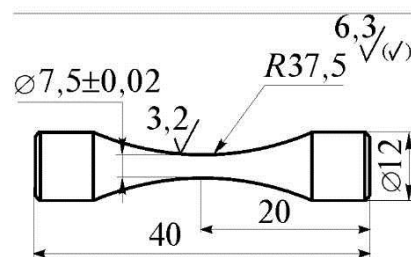


Рис. 5

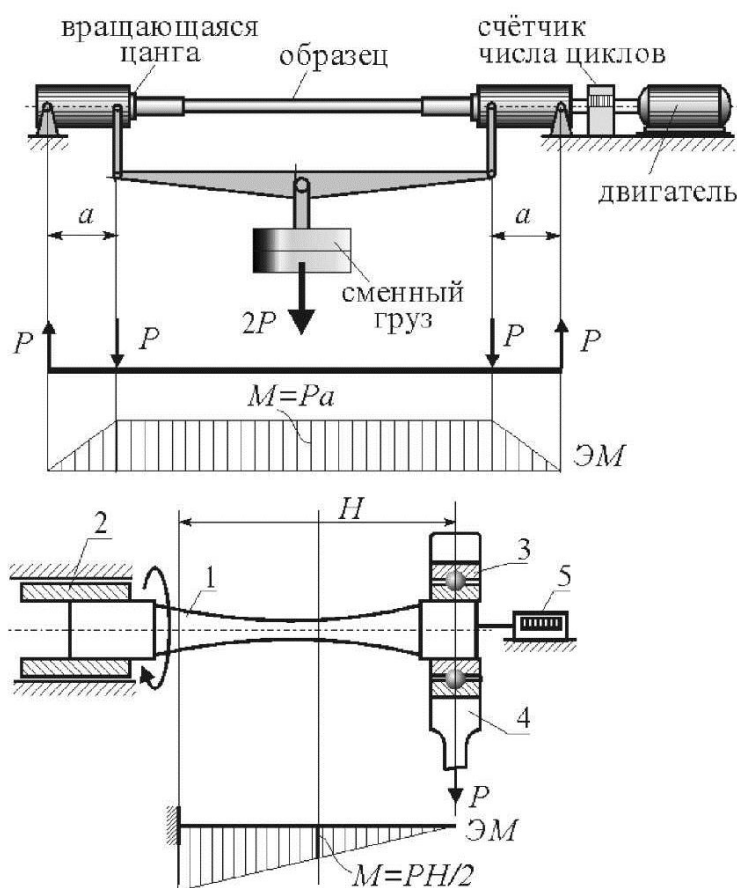


Рис.6

На рис. 6 показаны схемы испытательных машин с двухопорным и консольным креплением образца.

- 1 – испытуемый образец;
- 2 – вращающаяся цапга;
- 3 – подшипник;
- 4 – тяга со сменными грузами (P);
- 5 – счетчик числа

ЦИКЛОВ.

2.3. Методика проведения усталостных испытаний. Характеристики выносливости металлов.

Очевидно, чем выше значение амплитуды напряжений (σ_a) при фиксированных средних напряжениях σ_m , тем ниже число циклов (N), которое образец "может выдержать" до момента зарождения магистральной усталостной трещины. Таким образом, в отличие от статических испытаний, где определяются отдельные значения различных параметров (σ_T , $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ , δ , и др.), при усталостных испытаниях характеристикой выносливости конкретного материала становится зависимость σ_a-N . Для определения этой зависимости необходимо испытать партию (минимум 10...15 штук) одинаковых образцов из исследуемой марки стали или сплава, т.е. образцов из одной партии (плавки), с одинаковыми размерами, термообработкой, качеством поверхности. Ограничимся пока рассмотрением симметричного цикла ($\sigma_m=0$, $R=-1$) при линейном напряженном состоянии. Первый образец испытывают при наибольшей амплитуде напряжений, составляющей $(0,6...0,75)\sigma_b$, а последующие при снижающихся амплитудах. Каждому разрушившемуся образцу соответствует одна точка на графике; обработка результатов испытаний всех образцов методом наименьших квадратов позволяет получить зависимость среднего числа циклов до разрушения от амплитуды переменных напряжений. Ее называют кривой выносливости или кривой Велера по имени немецкого ученого, впервые начавшего в конце XIX века системные исследования усталостного разрушения.

Кривые выносливости могут быть построены при различных значениях коэффициента асимметрии цикла R_i . На рис. 7 показан типичный вид таких кривых для малоуглеродистой (кривая 1, экспериментальные данные отмечены точками) и легированной (кривая 2, экспериментальные данные отмечены крестиками) сталей. В логарифмических координатах кривые выносливости хорошо схематизируются кусочно-линейными зависимостями.

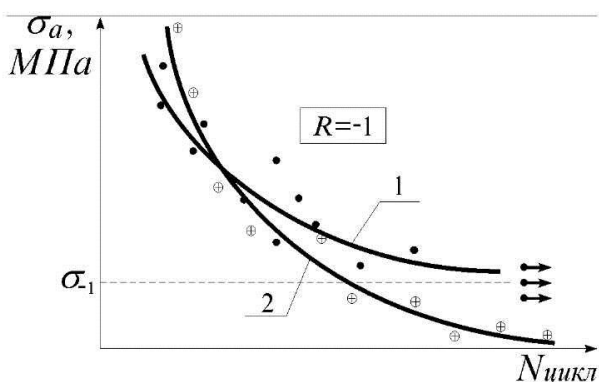


Рис 7

Такая схематизация позволяет описать результаты испытаний минимальным набором параметров.

Кривые первого типа (рис. 8а) характерны для сталей малой и средней прочности ($\sigma_e < 1200$ МПа) при нормальной температуре; кривые, изображенные на рис. 8б – для легированных сталей и титановых сплавов; кривые третьего типа (рис. 8в) – для алюминиевых сплавов и ряда жаропрочных сплавов при повышенных температурах.

На рис. 8 кривые выносливости изображены для симметричного цикла; их характеристики обычно считаются основными. Точка перелома на кривых первого типа обычно соответствует $10^6 - 10^7$ циклам, отвечающая ей амплитуда напряжений обозначается σ_{-1} и называется физическим пределом выносливости. При меньших амплитудах ($\sigma_a < \sigma_{-1}$) усталостное разрушение не наблюдается при числах циклов до 10^{12} (при больших числах циклов испытания обычно не проводятся).

Для кривых выносливости второго и третьего типа находится ус-

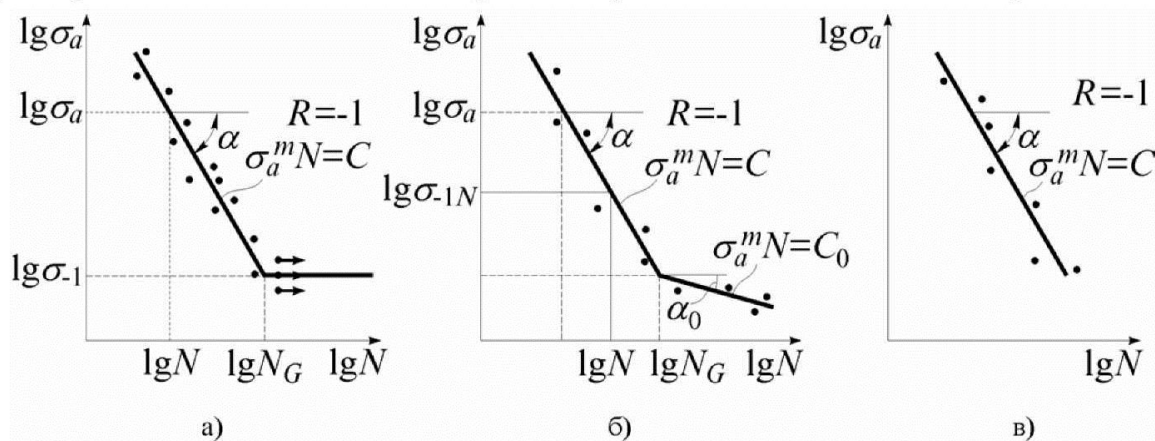


Рис.8

ловный предел выносливости σ_{-1N} – значение амплитуды напряжений, при котором происходит разрушение при заданном базовом числе циклов N , обычно $N = 2 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^7$ циклов. Для кривых второго типа (на рис. 8) определяется также число циклов, соответствующее точке перелома N_G (если оно не совпадает с σ_{-1N}) и соответствующая амплитуда напряжений. Кроме того, определяется наклон кривой выносливости. В частности, для первого участка кривых, изображенных на рис. 8а и 8б

$$\operatorname{ctg} \alpha = m = \frac{\lg N_G - \lg N}{\lg \sigma_a - \lg \sigma_{-1}}.$$

Уравнение кривой выносливости первого типа удобно записать теперь в виде:

$$N = N_G \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m \quad \text{при} \quad \sigma_a \geq \sigma_{-1}, \quad N = \infty \quad \text{при} \quad \sigma_a < \sigma_{-1}.$$

Уравнение кривой второго типа:

$$N = N_G \left[\frac{(\sigma_a)_{N_G}}{\sigma_a} \right]^m \quad \text{при} \quad \sigma_a \geq (\sigma_a)_{N_G},$$

$$N = N_G \left[\frac{(\sigma_a)_{N_G}}{\sigma_a} \right]^{m_0} \quad \text{при} \quad \sigma_a \leq (\sigma_a)_{N_G}.$$

Результаты испытаний образцов одной и той же стали при растяжении-сжатии и изгибе качественно одинаковы, но значения характеристик (в частности – предела выносливости) могут заметно различаться. В справочниках по свойствам материалов приводят значения пределов выносливости (физического и ограниченного) для каждого из этих видов нагружения. Аналогичные характеристики выносливости материалов при чистом сдвиге получают путем испытаний образцов на кручение; их обозначают соответственно τ_a , τ_m , τ_{-1} , τ_R и т.д.

Сведения о характеристиках выносливости применяемых в машиностроении конструкционных сталей и сплавов приводятся в справочной литературе.

В качестве примера в таблице приведены пределы выносливости некоторых материалов:

Материал	σ_{Tp} , МПа	$\sigma_{\sigma p}$, МПа	σ_{-1} , МПа	τ_{-1} , МПа
Сталь малоуглеродистая	180	320	150	80
Сталь 45 незакаленная	340	600	250	150
Сталь 30ХГСА закаленная, от- пуск	900	1100	500	250
Чугун серый	—	210	100	80
Алюминиевый сплав АМЦ термообработанный	130	170	65	

В случаях, когда в справочной литературе отсутствуют характеристики усталости интересующей марки стали, рекомендуется определять их по приближенным корреляционным зависимостям:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 \dots 0,5) \sigma_{\sigma p}; \quad \tau_{-1} \approx (0,5 \dots 0,7) \sigma_{-1};$$

$$m \approx \frac{1}{K_{\sigma D}} \left(5 + \frac{\sigma_{\sigma p}}{80} \right); \quad N_G = 2 \cdot 10^6 \dots 10^7 \text{ циклов.}$$

Здесь $\sigma_{\sigma p}$ – временное сопротивление при растяжении, МПа; $K_{\sigma D}(\tau_D)$ – коэффициент, учитывающий влияние различных факторов (см. п. 3).

В связи с тем, что определение характеристик выносливости материалов сопряжено с необходимостью проведения сложных и длительных экспериментов, на практике широко применяются ускоренные методы испытаний, обоснование и методики проведения которых изложены в работе: Олейник Н.В., Скляр С.П. “Ускоренные испытания на усталость”.

П Р И М Е Р По результатам лабораторных испытаний партии образцов требуется определить следующие параметры уравнения выносливости стали 20: предел ограниченной выносливости σ_{-1N} на базе $N = 10^7$ циклов и параметр наклона уравнения выносливости m . Результаты испытаний заимствованы из работы: А.В. Богданович, Л.А. Сосновский, Э.И. Старовойтов. Лабораторные работы по сопротивлению материалов усталости. Методические указания. Белорусский институт инженеров железнодорожного транспорта, Гомель, 1990.

Сталь 20 относится к классу углеродистых качественных сталей, широко применяемых для изготовления шестерен, червяков, муфт, сварных конструкций и других ответственных деталей; средние значения ее механических характеристик в состоянии нормализации равны: $\sigma_s = 420$ МПа, $\sigma_{0,2} = 340$ МПа, $\delta = 30\%$, $\psi = 55\%$. Испытания проведены

на машине УКИ-10М, работающей по схеме консольного изгиба с вращением и воспроизводящей симметричный цикл нагружения ($R = -1$).

При испытаниях использованы круглые образцы диаметром 10 мм с гладкой полированной поверхностью.

Результаты испытаний приведены в таблице и на рисунке 9.

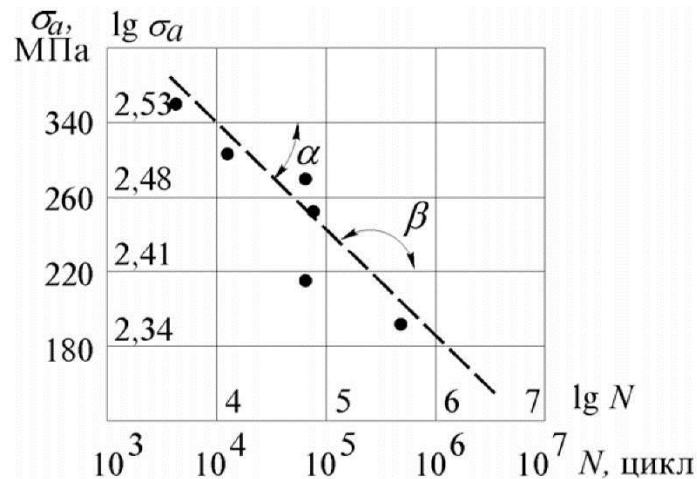


Рис. 9.

Результаты испытаний			Обработка результатов испытаний			
Номер образца	Амплитуда напряжений σ_{ai} , МПа	Число циклов до разрушения N_i , циклов	$y_i = \lg \sigma_{ai}$	$x_i = \lg N_i$	x_i^2	$x_i y_i$
1	342	6900	2,5340	3,8389	14,7372	9,7278
2	321	11300	2,5065	4,0531	16,4276	10,1591
3	310	41500	2,4914	4,6181	21,3268	11,5055
4	289	45200	2,4609	4,6551	21,6700	11,4557
5	257	75100	2,4099	4,8756	23,7715	11,7497
6	235	525300	2,3714	5,7204	32,7230	13,5654
			14,7741	27,7612	130,6561	68,1632

Как отмечалось, уравнение кривой выносливости в двойной логарифмической системе координат аппроксимируется линейной зависимостью:

$$y = ax + b,$$

где $x = \lg N$, $y = \lg \sigma_a$, параметр a представляет собой тангенс угла β наклона прямой к положительному направлению оси абсцисс, а параметр b определяет начальное значение $\lg \sigma_a$ при $\lg N = 0$.

Величины параметров a и b должны быть выбраны так, чтобы уравнение кривой выносливости наилучшим образом приближалось к экспериментальным результатам (x_i, y_i) , где i – номер опыта. Наиболее просто это приближение выполняется методом наименьших квадратов, в соответствии с которым коэффициенты линейной аппроксимации вычисляются по формулам:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{14,7741 \cdot 130,6561 - 68,1632 \cdot 27,7612}{6 \cdot 130,6561 - (27,7612)^2} = 2,87;$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{6 \cdot 68,1632 - 27,7612 \cdot 14,7741}{6 \cdot 130,6561 - (27,7612)^2} = -0,0881.$$

Аппроксимирующее выражение принимает вид:

$$\lg \sigma_a = 2,87 - 0,0881 \lg N,$$

из которого искомые параметры уравнения выносливости определяются следующим образом:

$$\lg(\sigma_{1N}) = 2,87 - 0,0881 \lg(10^7), \text{ откуда } \sigma_{1N} = 179,2 \text{ МПа};$$

$$m = \operatorname{ctg} \alpha = -\frac{1}{a} = -\frac{1}{-0,0881} = 11,4.$$

Итак, уравнение выносливости стали 20 имеет вид:

$$N = 10^7 \left(\frac{179,2}{\sigma_a} \right)^{11,4} \quad \text{при } \sigma_a \geq 179,2 \text{ МПа};$$

оно связывает значения амплитуды напряжений σ_a (в МПа) с наработкой до момента образования магистральной усталостной трещины N (в числах циклов).

В таблице представлены результаты оценки погрешности, характеризующие отличие между экспериментальными и расчетными значениями долговечности.

Номер образца	σ_a , МПа	$N_{эксп}$ цикл	$N_{расч}$ цикл	$\Delta N = \frac{N_o - N_p}{N_o} 100\%$
1	342	6900	7754	-12,4
2	321	11300	13366	-18,3
3	310	41500	21292	48,7
4	289	45200	43886	2,9
5	257	75100	147080	-95,8
6	235	525300	369090	-29,7

Видно, что разброс значений усталостной долговечности может быть весьма значительным. Этот факт характерен для явления усталостной прочности металлов.

3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ

Приводимые в справочной литературе характеристики выносливости материалов определяются при испытаниях стандартных образцов, имеющих малые размеры и ровную полированную поверхность. При этом в связи с особенностями испытательных машин лабораторные испытания проводятся при определенных циклах нагружения, чаще всего при симметричном.

Однако реальные детали машин отличаются от образцов конструкторско-технологическими особенностями и условиями нагружения, которые должны быть учтены при расчете конкретных деталей. Рассмотрим наиболее значимые факторы, определяющие усталостную прочность деталей.

3.1. Концентрация напряжений – эффект снижения предела выносливости, обусловленный местным увеличением (рис. 10) напряжений и изменением характера напряженного состояния по сравнению с номинальными в зоне резкого изменения очертания детали (у отверстий, канавок, резьбы, в галтельных переходах от одного сечения к другому, в зонах сварочных швов и т.п.).

Для оценки влияния концентрации напряжений используется несколько характеристик. Первая из них – теоретический коэффициент концентрации напряжений

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H} \text{ и } \alpha_{\tau} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_H}.$$

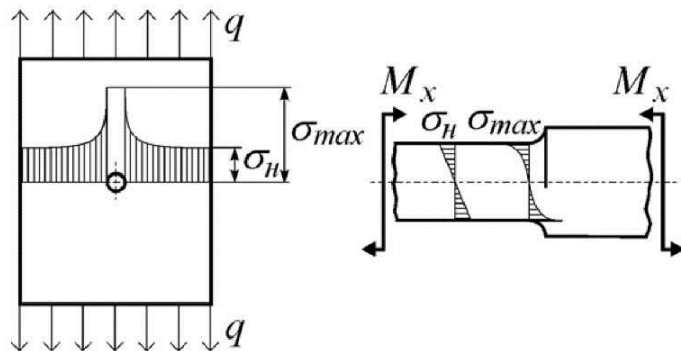


Рис.10

Теоретические коэффициен-

ты концентрации определяются расчетом или экспериментально; для различных видов концентраторов значения α_{σ} и α_{τ} приведены в справочной литературе; примеры показаны на рис. 11

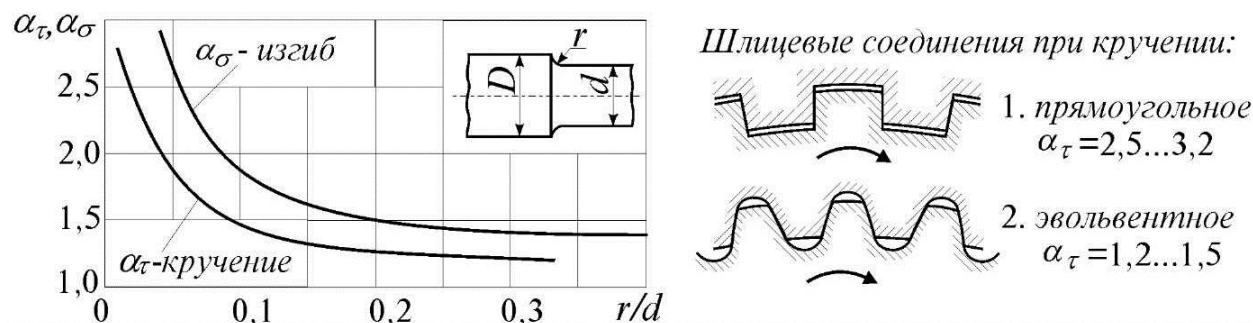


Рис. 11.

Приведенные примеры указывают на значительное влияние фактора концентрации напряжений на усталостную прочность деталей, поскольку теоретические коэффициенты концентрации, достигая значительных величин (при механической обработке $\alpha_{\sigma} = 1,5 \dots 3,0$; при сварке $\alpha_{\sigma} = 2 \dots 10$), оказываются при этом весьма чувствительными к изменению формы деталей. Так, варьирование профиля шлицевого соединения или радиуса галтельного перехода (рис. 11) приводит к двухкратному изменению коэффициентов концентрации, что вызывает необходимость повышения точности исследования напряженного состояния в зонах с нестандартными концентраторами. В настоящее время в инженерной практике широко используются пакеты прикладных программ метода конечных элементов (МКЭ), позволяющие путем компьютерного моделирования подробно исследовать напряженность деталей любой геометрической формы при их произвольном нагружении.

Однако теоретические коэффициенты концентрации отображают лишь геометрические особенности и вид нагружения, но не учитывают усталостные свойства материалов деталей. В связи с этим в расчетах используют эффективные коэффициенты концентрации напряжений:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}} \text{ и } K_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1K}},$$

где σ_{-1} и τ_{-1} – пределы выносливости гладких стандартных образцов, σ_{-1K} и τ_{-1K} – пределы выносливости образцов с соответствующими концентраторами.

Связь между теоретическим и эффективным коэффициентами концентрации может быть представлена в виде:

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}(\alpha_{\sigma} - 1),$$

где $0 < q_{\sigma} < 1$ – коэффициент чувствительности данного материала к концентрации напряжений. При $q_{\sigma} = 0$, $K_{\sigma} = 1$ – материал нечувствителен к местным напряжениям (чугуны); при $q_{\sigma} = 1$, $K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}$ – материал обладает полной чувствительностью к концентрации напряжений (высокопрочные легированные стали).

Пример определения q_{σ} по литературным данным приводится на рис. 12

Рекомендации по определению коэффициентов концентрации напряжений для различных деталей приводятся в справочной литературе (ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости).

3.2. Масштабный эффект, проявляется в виде снижения предела выносливости материала с увеличением размеров испытываемых образцов. Очевидно, этот эффект объясняется тем, что с увеличением объема рабочей части образца возрастает вероятность наличия в ней металлургических и технологических микродефектов. Учет масштабного фактора в расчетах выполняют путем введения коэффициентов: $K_{d\sigma} = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}}$ и $K_{d\tau} = \frac{\tau_{-1d}}{\tau_{-1}}$, здесь σ_{-1d} и τ_{-1d} – пределы выносливости образцов диаметра d .

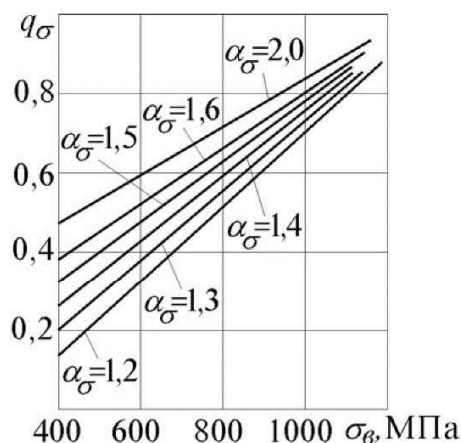


Рис.12

Пример определения коэффициентов масштабного фактора показан на рис.13. При расчетах крупногабаритных деталей, размеры которых превышают значение 100 мм, рекомендуется применять эмпирическую зависимость:

$$K_{d\sigma} = K_{d\tau} = K_{\infty} + (1 - K_{\infty})e^{-\lambda d},$$

где $K_{\infty} = 0,4$ – для литых деталей;

$K_{\infty} = 0,5$ – для деталей, полученных деформированием;

$\lambda = 0,01 \dots 0,03$ 1/мм;

d – характерный размер детали в мм.

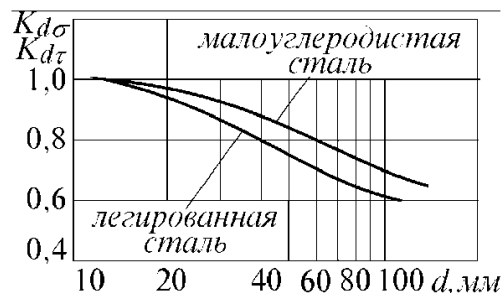


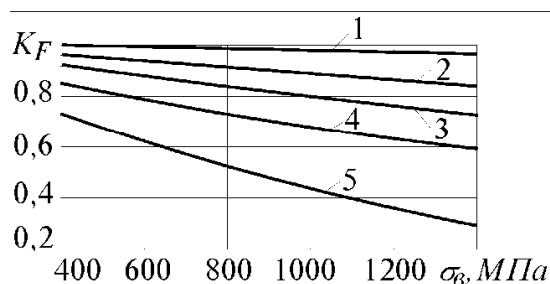
Рис.13

3.3. Качество обработки поверхности

значительно влияет на усталостные свойства деталей, поскольку их наружные слои часто оказываются наиболее напряженными (изгиб, кручение, внецентренное растяжение и др.). Учет этого фактора выполняют путем введения в расчеты коэффициента качества поверхности:

$K_F = \frac{\sigma_{-1F}}{\sigma_{-1}}$, здесь σ_{-1F} – предел выносливости образца, поверхность которого обработана так же, как поверхность рассчитываемой детали.

Пример определения коэффициента качества поверхности показан на рис.14.



- 1 - полирование;
- 2 - шлифование;
- 3 - тонкая обточка;
- 4 - грубая обточка;
- 5 - поверхность после прокатки с окалиной.

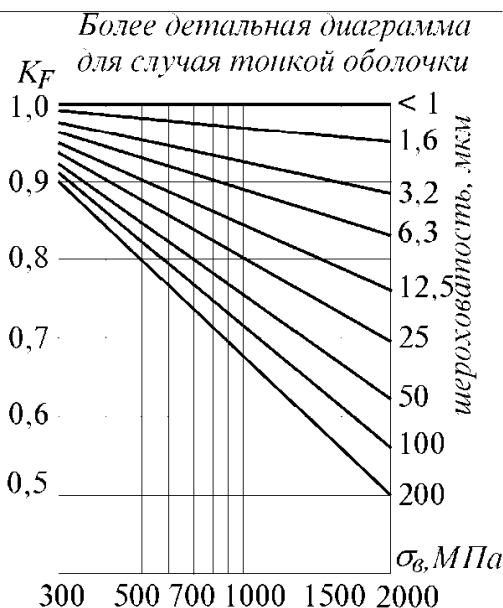


Рис.14

3.4. Методы технологического упрочнения поверхности детали позволяют в ряде случаев значительно повысить выносливость за счет наклепа поверхностного слоя, ликвидации части микродефектов и создания остаточных сжимающих напряжений, препятствующих образованию трещин на поверхности детали.

Учет фактора технологического упрочнения в расчетах выполняют путем введения коэффициента $K_V = \frac{\sigma_{-1V}}{\sigma_{-1}}$; здесь σ_{-1V} – предел выносливости образцов, прошедших определенный вид технологического упрочнения.

Пример определения коэффициента упрочнения по литературным данным представлен в таблице:

Значения K_V для углеродистых и легированных сталей

Тип упрочнения	Диаметр, мм	K_V
Закалка токами высокой частоты	7...20	1,30...1,60
	30...40	1,20...1,50
Азотирование на глубину 0,1...0,4 мм	8...15	1,15...1,25
	30...40	1,10...1,15
Цементация на глубину 0,2...0,6 мм	8...15	1,20...2,10
	30...40	1,10...1,15
Обкатка поверхности роликами	7...20	1,20...1,40
	30...40	1,10...1,25
Дробеструйный наклеп поверхности	7...20	1,10...1,30
	30...40	1,10...1,20

3.5. Комплексный учет влияния основных конструкторско-технологических факторов на усталостную прочность деталей.

Результирующее влияние основных факторов можно учесть введением в расчеты предела выносливости конкретной детали ($\sigma_{-1Д}$), который получают путем корректировки предела выносливости материала (σ_{-1}), определенного при стандартных испытаниях лабораторных образцов:

$$\sigma_{-1Д} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma Д}}; \quad \tau_{-1Д} = \frac{\tau_{-1}}{K_{\tau Д}}.$$

Если пренебречь взаимовлиянием различных факторов, то $K_{\sigma l}$ и $K_{\tau l}$ определяются по формулам

$$K_{\sigma D} = \frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma} K_F K_V}, \quad K_{\tau D} = \frac{K_{\tau}}{K_{d\tau} K_F K_V}.$$

Для учета взаимного влияния перечисленных факторов предложен ряд эмпирических формул, например

$$K_{\sigma D} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V}, \quad K_{\tau D} = \left(\frac{K_{\tau}}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V}.$$

Отметим, что в справочной литературе и отраслевых нормативных материалах приводятся рекомендации по учету других конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов, таких, как:

- повышенная и пониженная температура;
- коррозия;
- наличие агрессивных сред;
- радиация;
- наличие натяга;
- частота и форма цикла нагружения и др.

3.6 Учет асимметрии циклов напряжений

Приводимые в справочной литературе характеристики выносливости материалов обычно получают в результате проведения стандартных лабораторных испытаний, при которых в образцах воспроизводятся симметричные циклы напряжений ($\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \sigma_{\max} = |\sigma_{\min}|$, $R = -1$). В отличие от образцов реальные детали машин часто подвергаются действию различных асимметричных циклов, например, в таких условиях работает балка, на которой установлен стационарный агрегат с вращающимся неуравновешенным ротором (рис.15).

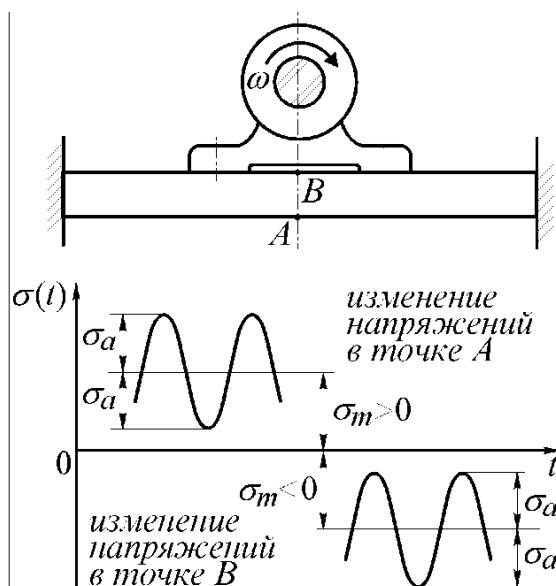


Рис.15

От действия силы тяжести агрегата в точке A балки возникают постоянные растягивающие напря-

жения $\sigma_m > 0$, на которые накладываются переменные во времени напряжения с амплитудой σ_a , обусловленные действием вертикальной составляющей центробежной силы от неуравновешенной массы вращающегося ротора. Аналогичная картина изменения напряжений имеет место в точке B балки; отличие состоит лишь в знаке постоянной составляющей напряжений $\sigma_m < 0$.

Диаграмма предельных амплитуд при асимметричных циклах ($\sigma_a - \sigma_m$) и ее схематизация

Для экспериментального определения характеристик выносливости материалов при асимметричном нагружении проводят на заданной базе N испытания нескольких партий образцов, для каждой из которых задается фиксированное значение среднего напряжения цикла σ_m , а величина амплитуды σ_a варьируется до установления значения ограниченного предела выносливости σ_{RN} (здесь $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$ – коэффициент асимметрии цикла, $N \leq N_G$ – базовое число циклов).

Рассмотрим наиболее повреждающий случай асимметричного нагружения, когда $\sigma_m > 0$. Обобщая результаты испытаний партий образцов с различными σ_m , строят диаграмму предельных амплитуд на базе N_G (рис. 16).

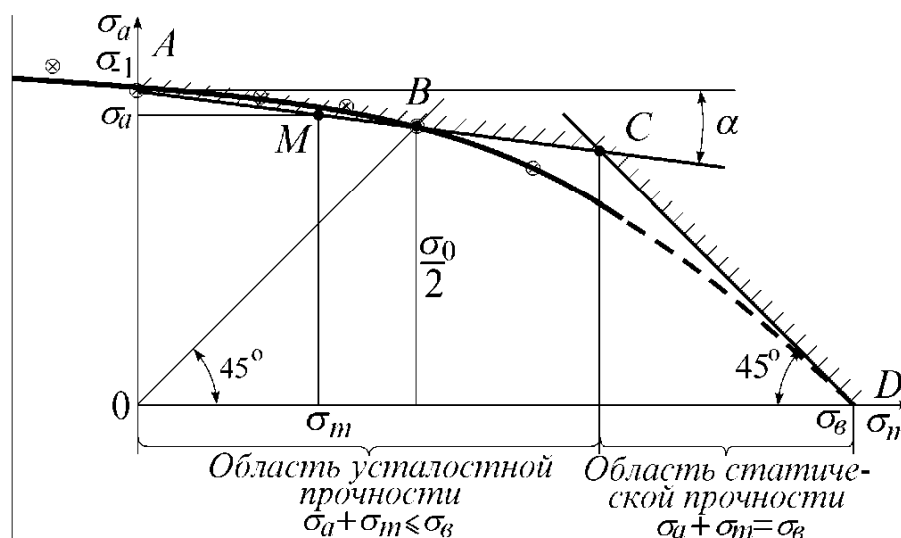


Рис. 16.

Полученную по экспериментальным точкам кривую ABD заменяют обычно двумя прямолинейными участками: ABC (проведенным через точки A и B) и CD , проведенным через точку D под углом 45° .

Точки A и B соответствуют случаям симметричного и положительного отнулевого циклов (здесь σ_0 – размах напряжений отнулевого цикла), а точка D – статическому разрушению при $\sigma_m = \sigma_0$.

Уравнение прямой ABC , схематизирующей условия появления усталостной трещины, имеет вид

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \sigma_m \operatorname{tg} \alpha,$$

где
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_{-1} - \frac{\sigma_0}{2}}{\frac{\sigma_0}{2}} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}.$$

Таким образом,

$$\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m = \sigma_{-1}, \quad \psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}.$$

Поскольку в этом выражении величина σ_{-1} по определению является предельной амплитудой на базе N_G , то ее следует рассматривать как амплитуду симметричного цикла, эквивалентную по повреждающему действию исходному асимметричному циклу с параметрами σ_a и σ_m для произвольной точки M .

Если принять допущение о том, что угол α не изменяется в зависимости от базы испытаний N , то аналогично предыдущему получаем:

$$\sigma_{-1N} = \sigma_{aN} + \psi_\sigma \sigma_{mN}$$

где σ_{aN} и σ_{mN} – амплитудное и среднее напряжения предельного для базы N асимметричного цикла;

σ_{-1N} – ограниченный предел выносливости при симметричном нагружении на базе N .

Обобщая приведенные результаты, получаем окончательные формулы приведения к симметричным циклам для материала образцов:

$$\sigma_{a0} = \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m$$

и по аналогии

$$\tau_{a0} = \tau_a + \psi_\tau \tau_m.$$

Здесь: индекс N опущен, σ_{a0} и τ_{a0} – эквивалентные по повреждающему действию (по числу циклов до момента образования усталостных трещин) амплитуды напряжений симметричного цикла.

Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что в области отрицательных средних напряжений цикла ординаты диаграммы предельных амплитуд начинают превышать значение σ_{-1} . Это позволяет с определенным приближением схематизировать диаграмму путем про-

должения отрезка CBA в область $\sigma_m < 0$ и, следовательно, для приведения асимметричных циклов с отрицательными средними напряжениями к симметричным применять полученные ранее формулы.

Величины ψ_σ и ψ_τ называют коэффициентами влияния асимметрии цикла для материала образцов; их рекомендуемые для сталей и сплавов значения приведены в таблице.

σ_v , МПа	ψ_σ	ψ_τ
350...550	0	0
520...750	0,05	0
700...1000	0,10	0,05
1000...1200	0,20	0,10

4. РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

В настоящем пособии рассматриваются два характерных случая изменения напряжений в деталях:

- случай регулярного циклического нагружения, при котором амплитуда переменных во времени напряжений остается постоянной ($\sigma_a = \text{const}$). В условиях регулярного нагружения работают детали большинства стационарных установок и сооружений, режим эксплуатации которых не изменяется во времени.
- случай нерегулярного (ступенчатого) циклического нагружения возникает в деталях машин, предназначенных для эксплуатации с переменными режимами. Например, изменение скорости движения автомобиля на различных участках дорог сопровождается переключением передач, что вызывает ступенчатое изменение нагрузок и, следовательно, соответствующее изменение амплитуды и частоты действия переменных напряжений.

Для оценки прочности конструкций при циклическом нагружении используются коэффициенты запаса двух типов:

- *коэффициент запаса по нагрузке*, представляющий собой отношение расчетной разрушающей нагрузки к действующей при заданном ресурсе по числу циклов. При многоцикловой усталости макрообъемы конструкции деформируются упруго, поэтому вместо отношения нагрузок можно использовать отношение соответствующих напряжений;

- *коэффициент запаса по долговечности* – отношение расчетного числа циклов до разрушения к проектному сроку службы конструкции при заданной эксплуатационной нагрузке.

Эти коэффициенты запаса связаны нелинейной зависимостью и в общем случае оба они должны быть не ниже нормативных значений, обеспечивающих надежную работу конструкций с учетом всех погрешностей расчетной схемы. Не всегда, однако, есть необходимость или возможность использовать оба коэффициента. Расчеты в области большой долговечности – при напряжениях ниже физического предела выносливости – ведется только с использованием коэффициента запаса *по напряжениям*, поскольку число циклов до разрушения в этом случае не может быть вычислено. Такие ситуации характерны для конструкций с большим (по числу циклов) сроком службы: от миллионов до 10^{12} и выше.

При сравнительно малой долговечности нередко определяют только коэффициент запаса *по долговечности*, поскольку нормирование запасов по нагрузке бывает недостаточно полным. Ограниченную долговечность имеет ряд тяжело нагруженных элементов дорожно-строительных, горнодобывающих и других машин, работающих в экстремальных условиях.

В настоящем пособии методики поверочного расчета усталостной прочности и долговечности рассматриваются на примерах деталей, материалу которых соответствует кривая усталости, имеющая горизонтальный участок и соответствующий физический предел выносливости. Такой вид кривой усталости имеют при нормальной температуре все конструкционные стали малой и средней прочности ($\sigma_b \leq 1200$ МПа).

4.1. Расчет в области большой долговечности при регулярном циклическом нагружении.

Можно легко убедиться в том, что при работе обычной стационарной установки со скоростью вращения ротора $n = 1000$ об/мин базовое число циклов $N_G = 2 \cdot 10^6 \dots 10^7$ циклов "нарабатывается" всего за 2...10 суток непрерывной эксплуатации.

Очевидно, в подобных случаях для обеспечения усталостной прочности деталей необходимо выполнение условия: $(\sigma_{a3})_Д < \sigma_{-1}$, т.е. амплитуда приведенных к симметричному циклу эквивалентных напряжений с учетом конструкторско-технологических особенностей де-

тали $(\sigma_{aэ})_Д$ должна быть существенно ниже предела выносливости материала σ_{-1} . Схема, поясняющая это условие, показана на рис. 17.

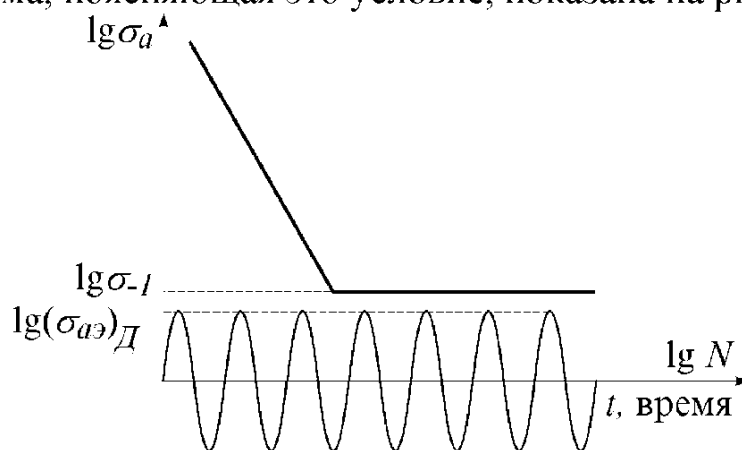


Рис.17

Для определения запаса по нагрузке необходимо вернуться к схематизированной диаграмме предельных амплитуд (рис. 18). Линия AB соответствует условиям образования магистральной трещины в стандартном образце. Точка A' соответствует условию образования трещины в детали при симметричном цикле

$$\sigma_{-1Д} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigmaД}} = \sigma_{-1} \frac{K_{d\sigma} K_F K_V}{K_{\sigma}}.$$

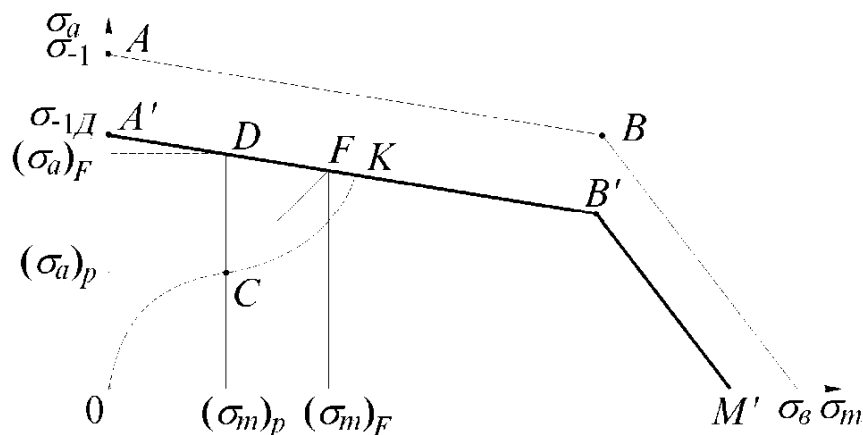


Рис. 18

Линию $A'B'$, отвечающую условиям образования трещины в детали при ненулевых средних напряжениях, с достаточной степенью точности можно считать параллельной линии AB (различие углов наклона – с учетом разбросов экспериментальных данных – обычно невелико). Тогда предельный (отвечающий появлению трещины) цикл изменения напряжений в детали характеризуется зависимостью

$$\sigma_{a/l} = \sigma_{-l/l} - \psi_{\sigma} \sigma_m.$$

Точка C на рис. 18 соответствует рабочим (эксплуатационным) расчетным значениям амплитуды и среднего напряжений в детали.

Коэффициент запаса по нагрузке должен характеризовать удаленность эксплуатационных параметров нагружения от предельных, т.е. удаленность точки C от линии ABM' . Чтобы оценить количественно эту удаленность, необходимо задать путь перехода от рабочего цикла к предельному. На рис. 18 показано несколько возможных путей: увеличение амплитуды напряжений при постоянном среднем CD (например, для балки с двигателем, изображенной на рис. 15, это соответствует увеличению только оборотов двигателя), пропорциональное увеличение амплитуды и среднего OCF (для той же балки – увеличение массы всех элементов двигателя при постоянной частоте вращения), произвольный путь OCK (штриховая кривая линия) и т.д.

Выбор того или иного пути перехода от рабочего цикла к предельному зависит от цели расчета; разным путям отвечают разные формулы для определения коэффициента запаса. Остановимся здесь на наиболее распространенном в практике пути с пропорциональным изменением амплитуды и среднего напряжения.

Коэффициент запаса в этом случае представляет собой отношение отрезков OF и OC на рис. 18:

$$n_{\sigma} = \frac{\overline{OF}}{\overline{OC}}.$$

Случай перехода из точки C на отрезке BM' , соответствующий статическому разрушению при первом нагружении конструкций, здесь не рассматривается.

Очевидно, что

$$n_{\sigma} = \frac{\overline{OF}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{LF}}{\overline{KC}} = \frac{\overline{OL}}{\overline{OK}} = \frac{(\sigma_a)_F}{(\sigma_a)_p} = \frac{(\sigma_m)_F}{(\sigma_m)_p}.$$

Координаты точки F , т.е. $(\sigma_a)_F$ и $(\sigma_m)_F$, находятся из совместного решения уравнений

$$\sigma_a = \sigma_{-l/l} - \psi_{\sigma} \sigma_m \quad \text{и} \quad \sigma_a = \sigma_m \frac{(\sigma_a)_p}{(\sigma_m)_p}.$$

Отсюда

$$(\sigma_m)_F = \frac{\sigma_{-1D}}{\frac{(\sigma_a)_p}{(\sigma_m)_p} + \psi_\sigma}$$

и формула для определения коэффициента запаса принимает вид

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1D}}{(\sigma_a)_p + \psi_\sigma (\sigma_m)_p} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma/l} [(\sigma_a)_p + \psi_\sigma (\sigma_m)_p]}.$$

По аналогии можно записать формулу для случая чистого сдвига:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1D}}{(\tau_a)_p + \psi_\tau (\tau_m)_p}.$$

При наличии экспериментальных данных о влиянии средних напряжений *в детали* на амплитуды предельного цикла

$$\sigma_a = \sigma_{-1/l} - \psi_{\sigma/l} \sigma_m$$

и в приведенных выше формулах вместо ψ_σ и ψ_τ подставляется соответственно $\psi_{\sigma/l}$ и $\psi_{\tau/l}$.

Знаменатели формул для определения коэффициентов запаса можно – по аналогии с соответствующими известными подходами и критериями пластичности – считать эквивалентными напряжениями, приведенными к симметричному циклу:

$$(\sigma_{a\sigma})_D = K_{\sigma D} (\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m);$$

$$(\tau_{a\tau})_D = K_{\tau D} (\tau_a + \psi_\tau \tau_m).$$

Отметим, что в первоначальных (устаревших) работах по усталостной долговечности все диаграммы предельных амплитуд для образца или детали схематизировалась одной соответствующей прямой, как показано на рис. 19. Аналогичный рассмотренному выше вывод приводит в этом случае к следующей формуле для определения коэффициента запаса при пропорциональном изменении амплитуды и среднего напряжения:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma/l} [(\sigma_a)_p + \psi_\sigma (\sigma_m)_p]},$$

где $\psi_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}$.

В настоящее время такой подход не используется.

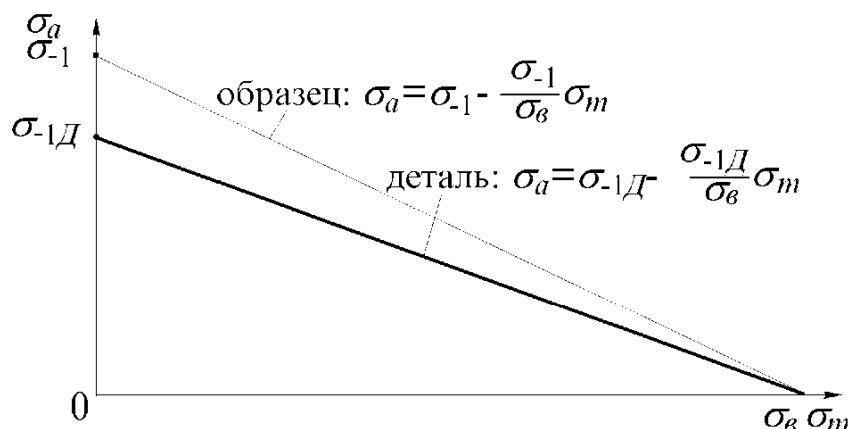


Рис. 19.

Более сложными являются случаи нагружения бруса, когда в его сечениях совместно действуют переменные во времени изгиб изгибающий и крутящий моменты или нормальная сила и крутящий момент. При этом в точках бруса действует смешанное плоское напряженное состояние, компоненты которого циклически изменяются во времени. Закономерности усталостного разрушения при такой напряженности изучены экспериментально путем испытаний цилиндрических образцов на специальных установках, воспроизводящих синфазное изменение изгибающего и крутящего моментов. Известны результаты экспериментальных исследований (рис.20), представляемых в виде диаграмм предельных амплитуд нормальных и касательных напряжений ($\sigma_{a np}$ и $\tau_{a np}$ на базе N_G), которые хорошо аппроксимируются эллиптическим уравнением Гафа-Полларда:

$$\left(\frac{\sigma_{a np}}{\sigma_{-1}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{a np}}{\tau_{-1}} \right)^2 = 1.$$

Очевидно: при $\sigma_{a np} = 0$, $\tau_{a np} = \tau_{-1}$ и при $\tau_{a np} = 0$, $\sigma_{a np} = \sigma_{-1}$.

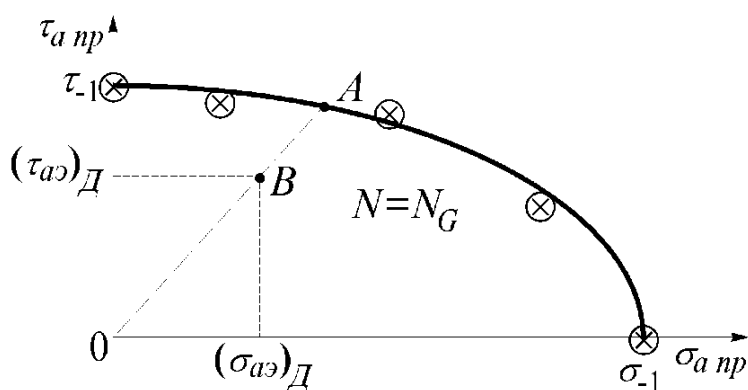


Рис.20

Для определения коэффициентов запаса по напряжениям в случае совместного действия переменных во времени нормальных и касательных напряжений ($n_{\sigma\tau}$) используют гипотезы, подобные гипотезам пластичности при статическом нагружении.

Обоснованием такого

подхода служат следующие обстоятельства:

1. Соотношения пределов текучести по нормальным и касательным напряжениям для различных материалов изменяются в том же (достаточно узком) интервале, что и соотношения пределов выносливости:

$$\frac{\sigma_T^2}{\tau_T^2} \approx \frac{\sigma_{-1}^2}{\tau_{-1}^2} \approx 3 \dots 4.$$

2. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что процесс многоциклового усталостного разрушения связан с развитием *микропластических деформаций*, что соответствует представлением классических теорий пластичности, устанавливающим условия перехода материала из упругого в пластическое состояние.

Если в условие пластичности, соответствующее гипотезе энергии формоизменения $\sqrt{\sigma_{np}^2 + 3\tau_{np}^2} = \sigma_T$ вместо значений статических предельных напряжений (σ_{np} и τ_{np}) подставить приведенные к симметричному циклу предельные амплитудные значения ($\sigma_{a np}$ и $\tau_{a np}$), а предел текучести заменить пределом выносливости σ_{-1} , то получим условие усталостного разрушения материала образца в виде:

$$\sqrt{\sigma_{a np}^2 + 3\tau_{a np}^2} = \sigma_{-1}.$$

Проверка достоверности этой гипотезы выполняется путем сопоставления расчетных и экспериментальных результатов. После подстановки в условие усталостного разрушения известного из опытов соотношения $\frac{\sigma_{-1}^2}{\tau_{-1}^2} \approx 3$ оно путем простых действий преобразуется в эл-

липтическое уравнение Гафа-Полларда, которое, как отмечалось, хорошо согласуется с известными экспериментальными результатами.

Теперь коэффициент запаса при совместном действии нормальных и касательных напряжений для конкретных деталей можно определить следующим образом:

$$n_{\sigma\tau} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{экв}}^{\text{уст}}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{(\sigma_{a\sigma})_{\text{Д}}^2 + 3(\tau_{a\sigma})_{\text{Д}}^2}},$$

где $\sigma_{\text{экв}}^{\text{уст}}$ – амплитуда эквивалентных нормальных напряжений, равноценная по усталостному повреждению совместному действию переменных нормальных и касательных напряжений; $(\sigma_{a\sigma})_{\text{Д}}$, $(\tau_{a\sigma})_{\text{Д}}$ – амплитудные значения, приведенных к симметричным циклам напряжений, учитывающие конструкторско-технологические факторы конкретных деталей.

После подстановки $\frac{\sigma_{-1}^2}{\tau_{-1}^2} = 3$ и простых преобразований получают

выражение для коэффициента запаса по напряжениям при совместном действии нормальных и касательных напряжений ($n_{\sigma\tau}$) через частные коэффициенты запаса (n_{σ} и n_{τ}) в следующем виде:

$$n_{\sigma\tau} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}.$$

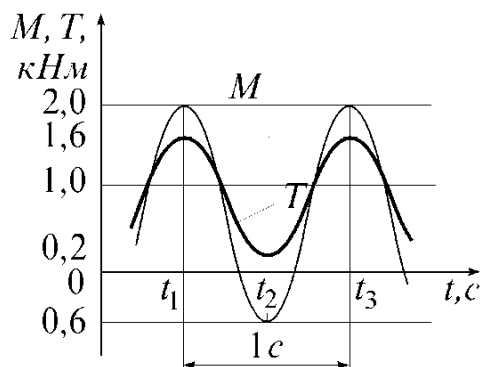
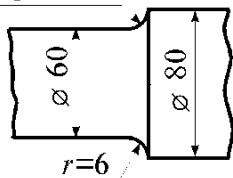
Этот результат также можно получить (рис.20), рассматривая коэффициент запаса $n_{\sigma\tau}$ как величину, отображающую удаленность рабочей точки (точки B с координатами $(\tau_{a\sigma})_{\text{Д}}$ и $(\sigma_{a\sigma})_{\text{Д}}$ на графике $\tau_{a\text{np}} - \sigma_{a\text{np}}$) от предельной эллиптической зависимости Гафа-Полларда. Если принять, что нормальные и касательные напряжения изменяются пропорционально значениям рабочей точки (т.е. по лучу OBA), то коэффициент запаса можно выразить:

$$n_{\sigma\tau} = \frac{OA}{OB} = \frac{\sigma_{a\text{np}}}{(\sigma_{a\sigma})_{\text{Д}}} = \frac{\tau_{a\text{np}}}{(\tau_{a\sigma})_{\text{Д}}}.$$

Подстановка этих соотношений в эллиптическое уравнение и преобразования приводят к полученному ранее выражению коэффициента запаса при совместном действии нормальных и касательных напряжений $n_{\sigma\tau}$.

П Р И М Е Р. Вал машины, предназначенной для непрерывной длительной эксплуатации, воспринимает нагрузки, вызывающие в опасном сечении действие переменных во времени изгибающего (M) и

закалка токами
высокой частоты;
шлифование



крутящего (T) моментов

(рис. 21). Требуется определить коэффициент запаса усталостной прочности вала.

Рис.21

1. **Исходные данные:** материал сталь 40Х;

$\sigma_b = 1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 800$ МПа, $\tau_b = 830$ МПа, $\tau_{0,3} = 400$ МПа,

$\sigma_{-1} = 500$ МПа, $\tau_{-1} = 280$ МПа, $N_G = 10^7$ циклов, $m = 9$.

Проектный срок эксплуатации детали составляет 5 лет непрерывной работы. Частота нагружения – 1 герц (3600 циклов за 1 час работы). Число циклов, которое вал должен наработать в течение проектного срока, равно:

$$N_{np} = 3600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 5 = 15,6 \cdot 10^7 \text{ циклов.}$$

Поскольку $N_{np} \gg N_G$, то расчет вала следует вести в области большой долговечности при котором необходимо выполнение условий: $(\sigma_{av})_d < \sigma_{-1}$, $(\tau_{av})_d < \tau_{-1}$.

2. **Определение параметров циклов напряжений**

Напряжения изгиба:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{M_{\max}}{0,1d^3} = \frac{2 \cdot 10^3}{0,1(0,06)^3} = 91,6 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\min}}{W_x} = \frac{-0,6 \cdot 10^3}{0,1(0,06)^3} = -27,6 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{91,6 + 27,6}{2} = 59,6 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{91,6 - 27,6}{2} = 32 \text{ МПа.}$$

Напряжения кручения:

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_p} = \frac{T_{\max}}{0,2d^3} = \frac{1,6 \cdot 10^3}{0,2(0,06)^3} = 37 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\min} = \frac{T_{\min}}{W_p} = \frac{0,2 \cdot 10^3}{0,2(0,06)^3} = 4,6 \text{ МПа};$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{37 - 4,6}{2} = 16,2 \text{ МПа};$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{37 + 4,6}{2} = 20,8 \text{ МПа}.$$

Отметим, что исследуемая деталь имеет значительные запасы статической прочности:

$$n_{\sigma 0,2} = \frac{800}{91,6} = 8,7; \quad n_{\tau 0,3} \cong \frac{400}{37} = 10,8.$$

3. Учет конструкторско-технологических факторов

Значения соответствующих коэффициентов определены по приведенным ранее зависимостям в виде графиков и таблиц.

1) Концентрация напряжений

Теоретические коэффициенты концентрации напряжений:

$$\alpha_{\sigma} = 1,8;$$

$$\alpha_{\tau} = 1,5.$$

Коэффициент чувствительности к концентрации напряжений:

$$q_{\sigma} = 0,9;$$

$$q_{\tau} = 0,85.$$

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений:

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}(\alpha_{\sigma} - 1) = 1,72;$$

$$K_{\tau} = 1 + q_{\tau}(\alpha_{\tau} - 1) = 1,43.$$

2) Масштабный фактор

$$K_{d\sigma} = K_{d\tau} = 0,65.$$

3) Состояние поверхности

Шлифование $K_F = 0,9$

4) Технологическое упрочнение

Закалка токами высокой частоты при $d = 60$ мм, $K_V = 1,3$.

5) Комплексный учет факторов

$$K_{\sigma/l} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \frac{1}{K_V} = \left(\frac{1,72}{0,65} + \frac{1}{0,9} - 1 \right) \frac{1}{1,3} = 2,12;$$

$$K_{\tau D} = \left(\frac{K_{\tau}}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_{I'}} - 1 \right) \frac{1}{K_V} = \left(\frac{1,43}{0,65} + \frac{1}{0,9} - 1 \right) \frac{1}{1,3} = 1,78.$$

4. Приведение напряжений к эквивалентным циклам

Коэффициенты влияния асимметрии $\psi_{\sigma}=0,1$; $\psi_{\tau}=0,05$.

$$(\sigma_{a\sigma})_{\text{Д}} = K_{\sigma/l} \cdot (\sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m) = 2,12 \cdot (59,6 + 0,1 \cdot 32) = 133,1 \text{ МПа};$$

$$(\tau_{a\sigma})_{\text{Д}} = K_{\tau/l} \cdot (\tau_a + \psi_{\tau} \tau_m) = 1,78 \cdot (16,2 + 0,05 \cdot 20,8) = 33,5 \text{ МПа};$$

Полученные результаты показывают, что условия, необходимые для работы вала в области большой долговечности, выполняются.

5. Определение коэффициентов запаса по напряжениям

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{a\sigma})_{\text{Д}}} = \frac{500}{133,1} \cong 3,76;$$

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{(\tau_{a\sigma})_{\text{Д}}} = \frac{280}{33,5} \cong 8,35;$$

$$n_{\sigma\tau} = \frac{n_{\sigma} n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \cong 3,15.$$

Нормативные значения коэффициентов запаса, при которых усталостная прочность деталей считается обеспеченной, приводятся в отраслевых нормах прочности; как правило, $[n_{\sigma\tau}]$ не ниже 1,5...2,5.

4.2. Расчет в области ограниченной долговечности при регулярном циклическом нагружении выполняется для конструкций с заведомо

ограниченным сроком эксплуатации $(\sigma_{a\sigma})_{\text{Д}} > \sigma_{-1}$.

Схема, поясняющая это условие, показана на рис.22.

В этом случае используют понятие коэффициента запаса по долговечности, отображающего соотношение между расчетной наработкой изделия до момента образования усталостных трещин (N_p) и проектным сроком эксплуатации, выраженным в числах циклов

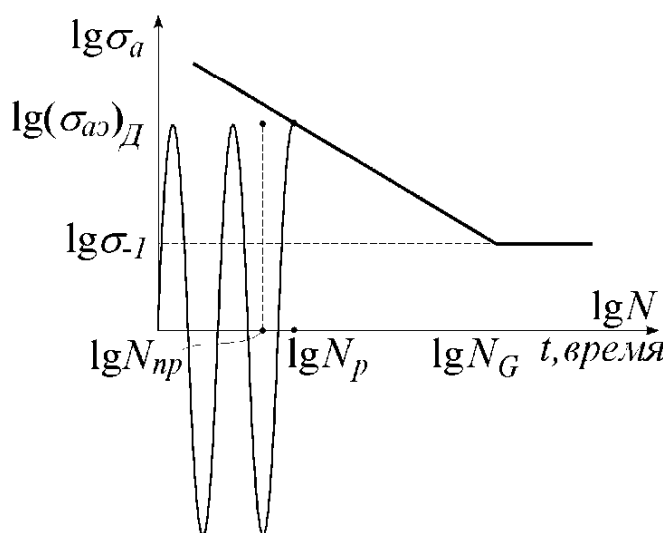


Рис.22.

нагружения (N_{np}):

$$n_0 = \frac{N_p}{N_{np}},$$

где
$$N_p = N_G \left[\frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{aэ})_Д} \right]^m.$$

П Р И М Е Р. Рабочее оборудование землеройной машины подвергается действию интенсивных циклических нагрузок, вызывающих одновременно повышенный износ и усталостное повреждение деталей. Срок службы тяжело нагруженных деталей (например, съемных зубьев ковша экскаватора) определяется их износом; после одной тысячи часов работы производится их полная замена.

Требуется определить коэффициент запаса по усталостной долговечности деталей по отношению к проектному (нормативному) сроку службы 1000 часов.

1. Исходные данные.

Материал деталей: сталь 30ХГСН2А

$\sigma_s = 1500$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1300$ МПа, $\sigma_{-1} = 700$ МПа, $m = 4$, $N_G = 10^7$ циклов.

Коэффициент комплексного учета конструкторско-технологических факторов определен предварительно: $K_{\sigma l} = 2,1$. Коэффициент влияния асимметрии $\psi_\sigma = 0,2$.

Цикл напряжений – положительный отнулевой, период и размах показаны на рисунке 23.

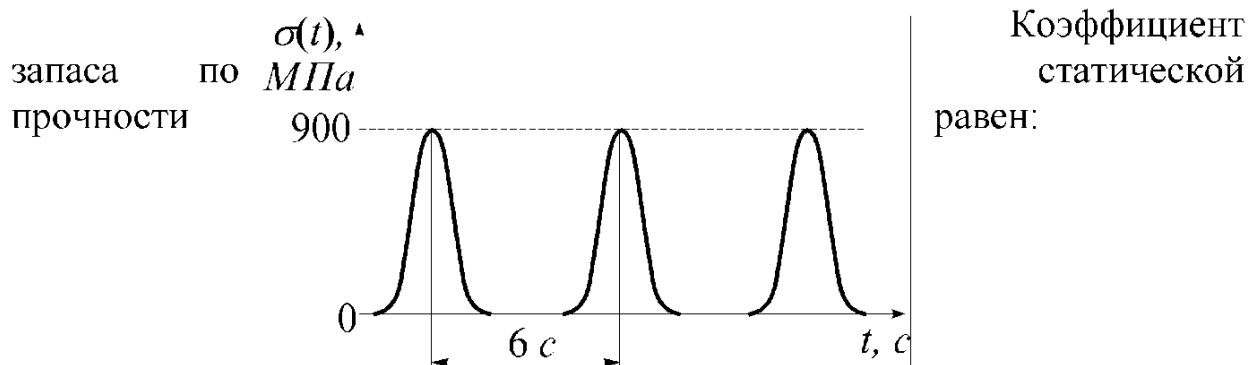


Рис. 23

$$n = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\max}} = \frac{1300}{900} = 1,45.$$

Число циклов, которое деталь наработывает в течение проектного срока:

$$N_{np} = \frac{3600}{6} \cdot 1000 = 0,6 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

Поскольку базовое число циклов кривой усталости для стали 30ХГСН2А значительно превосходит проектную долговечность ($N_G \gg N_{np}$), то с точки зрения усталости целесообразно допустить работу детали в области ограниченной долговечности, когда $(\sigma_{aэ})_{Д} > \sigma_{-1}$.

2. Определение параметров цикла и приведение к эквивалентной амплитуде напряжений

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} \mp \sigma_{\min}}{2} = \frac{900 \mp 0}{2} = 450 \text{ МПа.}$$

Амплитуда эквивалентного цикла:

$$(\sigma_{aэ})_{Д} = K_{\sigma/l} \cdot (\sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m) = 2,1 \cdot (450 + 0,2 \cdot 450) \cong 1130 \text{ МПа.}$$

Полученное значение показывает, что условие, необходимое для работы деталей в области ограниченной долговечности, выполняется ($(\sigma_{aэ})_{Д} > \sigma_{-1}$).

3. Определение коэффициента запаса по усталостной долговечности

Расчетная долговечность детали по усталостной прочности составляет:

$$N_p = N_G \frac{\sigma_{-1}^m}{(\sigma_{aэ})_{Д}^m} = 10^7 \frac{(700)^4}{(1134)^4} = 1,45 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

Коэффициент запаса усталостной долговечности детали по отношению к проектной равен:

$$n_{\sigma} = \frac{N_p}{N_{np}} = \frac{1,45 \cdot 10^6}{0,6 \cdot 10^6} = 2,4.$$

4.3. Расчеты при нерегулярном (ступенчатом) циклическом нагружении

Такой вид нагружения испытывают детали машин, работа которых в процессе эксплуатации связана с изменением характера внешнего воздействия. Примерами могут служить: энергетические установки, режим работы которых изменяется в различное время суток; сельскохозяйственные, дорожностроительные и другие машины, выполняющие

различные операции сезонного характера; транспортные средства, предназначенные для использования в различных природно-климатических условиях и т.п. Очевидно, что смена условий эксплуатации сопровождается изменением амплитуды и частоты действия переменных напряжений в узлах и деталях машин. В таких случаях нагруженность деталей задается **блоком нагружения** (рис.24), в виде совокупности уровней амплитуд напряжений σ_{ai} и соответствующих им чисел циклов v_i , которые деталь “нарабатывает” на i -ом уровне амплитуд напряжений за время реализации единицы параметра долговечности, принятого для исследуемого изделия (например: одного года эксплуатации, одного километра пробега, одной рабочей операции и т.п.). Для упрощения обозначений здесь под σ_{ai} понимается амплитудное значение приведенных к симметричному циклу эквивалентных напряжений для детали, которое ранее обозначалось $(\sigma_{ai})_t$, $i=1, 2, \dots, s$

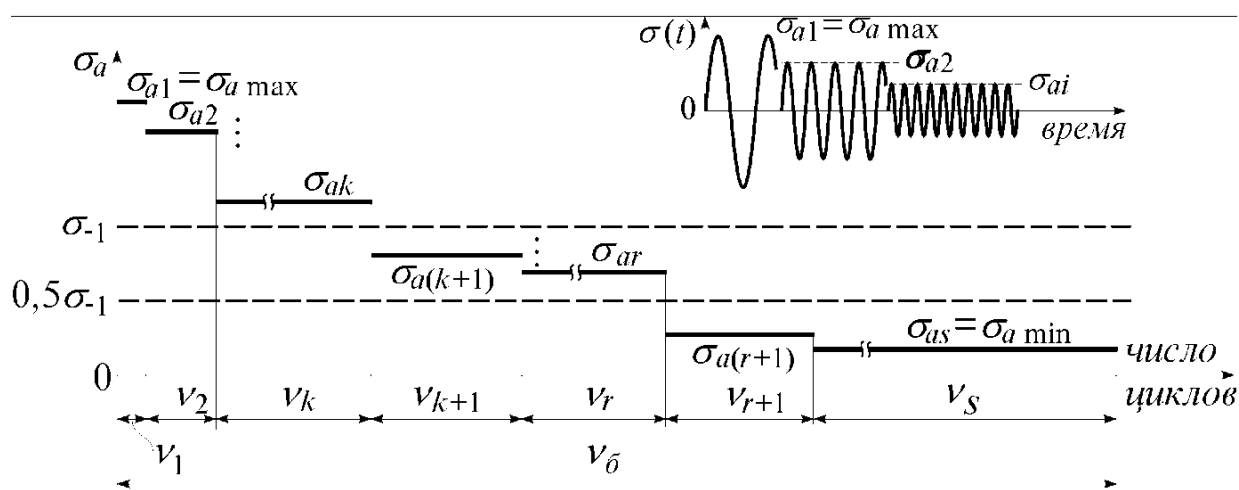


Рис.24

4.3.1. Расчет в области большой долговечности производится в случаях, когда максимальное напряжение блока не превышает предела выносливости ($\sigma_{a1} = \sigma_{a \max} < \sigma_{-1}$), а гарантийный срок службы изделия практически неограничен. По аналогии с п. 4.1 расчет сводится к определению коэффициента запаса по напряжениям:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{a \max}}.$$

4.3.2. Расчет в области ограниченной долговечности производится в случаях, когда часть уровней напряжений в блоке превышает значения предела выносливости:

$$\sigma_{a1} > \sigma_{a2} > \dots > \sigma_{ak} \geq \sigma_{-1}; \quad \sigma_{a(k+1)} < \sigma_{-1}.$$

В этих случаях возникает необходимость учесть наложение усталостных повреждений от различных ступеней нагружения, для чего в инженерных расчетах широкое применение получила гипотеза линейного суммирования повреждений. Можно принять, что накопленное к моменту образования усталостной микротрещины повреждение равно единице. В случае регулярного нагружения на уровне напряжений σ_{ai} деталь могла бы поработать N_i число циклов до повреждения, равного единице, и доля усталостного повреждения, приходящая, на один цикл, составила бы $1/N_i$ (рис.25). При нерегулярном нагружении деталь “нарабатывает” до разрушения на этом уровне лишь n_i число циклов ($n_i < N_i$) и, следовательно, доля усталостного повреждения, приходящаяся на i -ый уровень, составит величину $n_i/N_i < 1$. Теперь в соответствии с гипотезой линейного суммирования повреждений условие появления усталостной трещины вследствие последовательного действия различных уровней напряжений, входящих в блок нагружения, получает следующий вид:

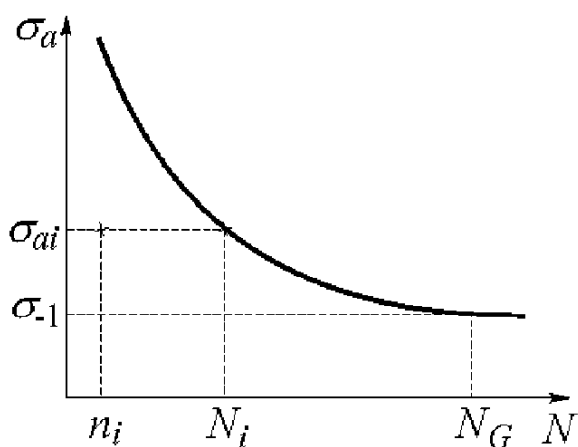


Рис.25

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1,$$

или после подстановки выражения для N_i , вытекающего из степенного уравнения кривой Велера:

$$\frac{1}{N_G \sigma_{-1}^m} \sum_{i=1}^k n_i \sigma_{ai}^m = 1.$$

В настоящее время широко применяется предложенная С.В.Серенсеном и В.П.Когаевым скорректированная гипотеза линейного суммирования повреждений, позволяющая значительно повысить достоверность инженерных расчетов; основные ее положения:

1. экспериментально установлено, что при наличии в блоке амплитуд напряжений, превышающих предел выносливости ($\sigma_{ak} \geq \sigma_{-1}$), повреждающее действие начинают оказывать также уровни напряжений, для которых $\sigma_{ar} \geq 0,5\sigma_{-1}$. (см. рис.24) Здесь r – максимальный номер

уровня напряжений, превышающего повреждающую часть блока ($\sigma_{ar} \geq 0,5\sigma_{-1}$, $\sigma_{a(r+1)} < 0,5\sigma_{-1}$).

2. предельное значение суммы относительных повреждений вместо единицы принимается равным величине a_p , зависящей от формы цикла нагружения:

$$a_p = \frac{\sigma_{a \max} \xi - 0,5\sigma_{-1}}{\sigma_{a \max} - 0,5\sigma_{-1}}.$$

где $\xi = \sum_{i=1}^r \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} t_i$.

Здесь $t_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^S v_i}$ – относительная наработка на i -ом уровне амплитуд на-

пряжений, S – полное число уровней, входящих в блок нагружения; $0,1 \leq a_p \leq 1$.

С учетом сказанного условие образования усталостной трещины по скорректированной гипотезе линейного суммирования получает вид:

$$\frac{1}{N_G \sigma_{-1}^m} \sum_{i=1}^k n_i \sigma_{ai}^m = a_p.$$

Здесь k – максимальный номер уровня напряжений, превышающего предел выносливости ($\sigma_{ak} \geq \sigma_{-1}$, $\sigma_{a(k+1)} < \sigma_{-1}$).

Теперь расчет долговечности сводится к определению числа блоков нагружения, которое изделие набирает к моменту образования усталостной трещины. Обозначив эту величину $\lambda_{расч}$ и учитывая, что $n_i = v_i \lambda_{расч}$, получают:

$$\lambda_{расч} = \frac{a_p N_G \sigma_{-1}^m}{\sum_{i=1}^k v_i \sigma_{ai}^m}.$$

По аналогии с п. 4.2. коэффициент запаса по долговечности определяют:

$$n_{\partial} = \frac{\lambda_{расч}}{\lambda_{пр}}.$$

Здесь λ_{np} – проектная долговечность изделия, выраженная в числе блоков нагружения.

П Р И М Е Р . Гарантийный срок эксплуатации сельскохозяйственного трактора многоцелевого назначения составляет 5000 часов. В качестве параметра долговечности, естественно, принят один час производительной работы, следовательно, проектная долговечность трактора составляет $\lambda_{np} = 5000$ часов. Требуется оценить ресурс тяжелонагруженных деталей гусеницы, которые в зоне ведущего колеса испытывают действие значительных напряжений.

Материал деталей – сталь 40Х, $\sigma_s = 1100$ МПа, $\sigma_{-1} = 510$ МПа, $N_G = 10^7$ циклов, $m = 9$.

Исходные данные об условиях эксплуатации трактора и промежуточные результаты расчета представлены в таблице.

Виды работ	Коэффициент использования β_i	$(\sigma_{ai})_{Д}$, σ_{ai} , МПа	Частота f_i , циклов/час	$v_i = \beta_i f_i$	$t_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^s v_i}$
Бульдозирование	0,03	540	100	3	0,01
Пахота	0,12	530	250	30	0,1
Обработка посевов	0,2	520	350	70	0,21
Обустройство проселочных дорог	0,1	460	350	35	0,11
Транспортные работы	0,2	300	400	80	0,24
Покос	0,1	260	350	35	0,11
Другие виды работ	0,25	200	300	75	0,22

Данные таблицы определяют параметры блока нагружения в виде совокупности амплитуд напряжений (σ_{ai}) и соответствующих им чисел циклов, “нарабатываемых деталью” в течение одного часа эксплуатации трактора только на этом уровне (v_i). Анализ показывает, что из семи уровней напряжений, входящих в блок ($S = 7$), в трех первых амплитуды эквивалентных напряжений превышают значения предела выносливости ($k = 3$, $\sigma_{ak} > 510$ МПа), а в шести первых имеет место превышение половины предела выносливости ($r = 6$, $\sigma_{ar} > 255$ МПа).

Параметры ξ и a_p определяем с учетом всех режимов работы:

$$\xi = \sum_{i=1}^{r=6} \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}} t_i = 0,63;$$

$$a_p = \frac{\sigma_{a \max} \xi - 0,5 \sigma_{-1}}{\sigma_{a \max} - 0,5 \sigma_{-1}} = 0,34.$$

Определим значение выражения:

$$\sum_{i=1}^{k=3} \nu_i \sigma_{ai}^m = 3 \cdot (540)^9 + 30 \cdot (530)^9 + 70 \cdot (520)^9 =$$

$$= (11,712 + 98,97 + 194,6) \cdot 10^{24} = 305,28 \cdot 10^{24}.$$

Сопоставление слагаемых, стоящих в скобках, позволяет оценить совокупное влияние амплитуд и числа нагружений, а также вклад каждого вида выполняемых трактором работ в интенсивность накопления усталостного повреждения деталей.

Поскольку при формировании блока нагружения в качестве параметра долговечности был принят один час работы трактора, то расчетное число блоков определяет долговечность деталей гусеницы в часах:

$$\lambda_{расч} = \frac{a_p N_G \sigma_{-1}^m}{\sum_{i=1}^{k=3} \nu_i \sigma_{ai}^m} = \frac{0,34 \cdot 10^7 \cdot (510)^9}{305,28 \cdot 10^{24}} \cong 26000 \text{ час.}$$

Коэффициент запаса по долговечности:

$$n_d = \frac{\lambda_{расч}}{\lambda_{нр}} = \frac{26000}{5000} \cong 5,2.$$

Следует отметить, что характерной особенностью явления усталостной прочности металлов является значительное рассеяние долговечности по сравнению с разбросом предела выносливости. В связи с этим нормативные значения коэффициентов запаса по долговечности принимаются более высокими по сравнению с коэффициентами запаса по напряжениям. Так, усталостная прочность деталей считается обеспеченной, если нормативные коэффициенты запаса по напряжениям $[n_{\sigma}] = 1,5 \dots 2,5$, а нормативные коэффициенты запаса по долговечности $[n_d] = 3 \dots 5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает анализ причин отказов технических систем, более чем в половине случаев, разрушения связаны с усталостным повреждением элементов машин, оборудования и сооружений. Такое положение объясняют спецификой явления многоциклового усталости, в частности:

- зарождением и развитием трещин при относительно низких напряжениях, что нередко на стадии проектирования усыпляет внимание конструкторов;
- чувствительностью к различным конструкторским, технологическим и эксплуатационным факторам;
- значительным рассеянием характеристик выносливости по сравнению с характеристиками статической прочности, при этом разброс долговечности достигает десятикратных значений;
- локальным и избирательным характером зарождения трещин и их развитием без проявления видимых остаточных перемещений вплоть до моментов возникновения аварийных ситуаций и другое.

Поэтому весьма актуальной становится проблема предотвращения усталостных разрушений ответственных деталей, особенно в тех отраслях, где возникновение аварий ведет к катастрофическим последствиям.

Следует отметить, что в настоящее время особое значение приобретают методы прогнозирования и обеспечения усталостной долговечности в связи с обоснованием возможности продления нормативных сроков эксплуатации работающих машин, оборудования и сооружений.

Современная теория сопротивления усталости базируется на накопленных к настоящему времени разрозненных экспериментальных фактах, объединение и систематизация которых позволяют предложить лишь приближенные методы решения практических задач.

Предлагаемое пособие в рамках курса “Сопротивление материалов” знакомит будущих инженеров лишь с основными закономерностями явления многоциклового усталости и методами расчетов на прочность при переменных нагрузках. Для более глубокого изучения проблемы следует обратиться к фундаментальным изданиям и к литературе по инженерным отраслям, в которой отображены специфические для разных областей техники актуальные вопросы, такие как:

- испытания конструкционных материалов в статистическом аспекте и учет вероятностных характеристик сопротивления усталости в расчетах;
- расчет прочности и долговечности деталей, испытывающих действие нагрузок в виде случайных процессов;
- применение современных вычислительных средств (например, специализированных ЭВМ программ метода конечных элементов) для детального исследования напряженного состояния в зонах с нестандартными концентраторами напряжений;
- учет влияния на характеристики выносливости процессов изготовления деталей (механическая и термическая обработка, сварка и др.), а также технологического упрочнения (обкатка поверхности роликами, дробеструйный наклеп и другое);
- расчет долговечности конструкций с учетом стадии устойчивого докритического развития усталостных трещин (стадия “живучести”);
- учет в расчетах долговечности сложного нагружения, когда компоненты напряженного состояния изменяются случайно;
- методы ускоренных ресурсных испытаний конструкций в стендовых и натурных условиях.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. При каком нагружении возникает усталостное разрушение деталей?
2. Какие существуют разновидности усталостного разрушения? В чем состоят отличия условий нагружения, механизмов повреждения и результатов испытаний при мало- и многоциклового усталости?
3. Опишите основные признаки излома деталей при многоцикловом усталостном разрушении.
4. Какими параметрами характеризуется напряженность деталей при циклическом нагружении?
5. В чем состоит принципиальное отличие характеристик прочности металлов при статическом и циклическом нагружениях?
6. Опишите методику проведения усталостных испытаний.
7. Зависимость между какими величинами является основной характеристикой выносливости? Отметьте разновидности этой зависимости для различных металлов и сплавов.
8. Запишите уравнение выносливости, укажите, между какими величинами устанавливается связь в этом уравнении.
9. Назовите основные конструкторско-технологические факторы, влияющие на усталостную прочность деталей.
10. Чем обусловлены и как учитываются в расчетах такие факторы, как концентрация напряжений, размеры и качество обработки поверхности деталей, технологическое упрочнение и другое?
11. Как в расчетах усталостной прочности учитывается влияние комплекса различных конструкторско-технологических факторов?
12. Какой вид циклического нагружения называют асимметричным?
13. Зависимость между какими величинами описывает диаграмма предельных амплитуд при асимметричном нагружении? Как схематизируется реальная диаграмма?
14. Сформулируйте понятие эквивалентной по повреждающему действию амплитуды симметричного цикла. Как эквивалентная амплитуда выражается через параметры исходного асимметричного цикла ?

15. В каких случаях при расчетах деталей машин на выносливость рассматривают случаи регулярного и нерегулярного (ступенчатого) циклического нагружения?
16. Для расчета деталей каких машин применяют методы расчета на выносливость в области большой или ограниченной долговечности? Какие понятия коэффициентов запаса вводятся в этих случаях?
17. Какое условие должно быть выполнено в расчетах деталей в области большой долговечности при регулярном циклическом нагружении? Как в этом случае определяется коэффициент запаса по напряжениям при простых (растяжение-сжатие, изгиб, кручение) и сложном (изгиб с кручением, растяжение-сжатие с кручением и др.) нагружениях?
18. Какое условие принимается в расчетах деталей в области ограниченной долговечности при регулярном циклическом нагружении? Как в этом случае определяется коэффициент запаса по долговечности?
19. Сформулируйте понятие блока нагружения при нерегулярном (ступенчатом) изменении амплитуд напряжений. Какими параметрами он описывается?
20. Вследствие чего в расчеты при нерегулярном нагружении возникает необходимость введения гипотез суммирования усталостных повреждений? В чем заключается суть гипотезы линейного суммирования?
21. Запишите условие усталостного разрушения по гипотезе линейного суммирования повреждений и вытекающее из него выражение для расчета усталостной долговечности.
22. Как определяются коэффициенты запаса по напряжениям и долговечности в расчетах при нерегулярном (ступенчатом) циклическом нагружении?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО РАЗДЕЛУ “МНОГОЦИКЛОВОЕ УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ”

Основная

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М., Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 589 с.
2. Сопротивление материалов./Под ред. Г.С.Писаренко.– 5-е издание, перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1986. – 775 с.
3. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. – М., Наука, 1986. – 560 с.

Дополнительная

1. Когаев В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М., Машиностроение, 1993. – 354 с.
2. Светлицкий В.А. Статистическая механика и теория надежности.– М., Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002.
3. Гусев А.С., Светлицкий В.А. Расчет конструкций при случайных воздействиях.– М., Машиностроение, 1984. – 240 с.
4. Трошенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник, ч. 1 и 2.– Киев: Наукова думка, 1987.
5. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник.– М., Металлургия, 1978. – 302 с.
6. Олейник Н.В., Скляр С.П. Ускоренные испытания на усталость. – Киев, Наукова думка. 1985. – 324 с.
7. Шлюшенков А.П. Механика многоциклового усталостного разрушения. – Учебное пособие.– Брянск БИТМ, 1990. – 156 с.
8. ГОСТ 23.207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.
9. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний на усталость.
10. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.

II. ПОНЯТИЕ О МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

При многоцикловой усталости, рассмотренной выше, конструкция в целом деформируется упруго; пластические деформации, ведущие к образованию трещин, имеют место лишь в микрообъемах с размерами, близкими к размерам структурных составляющих материала (зерен, пор, включений и т.д.). Число циклов до появления трещины измеряется в стальных конструкциях миллионами. При увеличении размеров пластической зоны и величины пластической деформации число циклов до разрушения уменьшается. Когда пластические деформации являются уже макроскопическими, т.е. охватывают объем, существенно больший структурных составляющих, но еще малы по сравнению с упругими, число циклов до образования трещины зависит от величин как упругой, так и пластической деформации и в конструкциях из пластичных сталей и сплавов оказывается в диапазоне 10^4 - 10^5 . При дальнейшем увеличении пластических деформаций число циклов до разрушения определяется в основном пластической деформацией в макрообъеме, а соответствующее усталостное разрушение называют малоцикловым (для сталей – от нескольких до 10^4 циклов). Границы между малоцикловой усталостью, переходной зоной и многоцикловой усталостью условны и зависят от пластичности материала. Иногда к малоцикловым относят все процессы разрушения, связанные с циклическим неупругим деформированием, т.е. все, что не является многоцикловой усталостью. Такой подход удобен, в частности, для малопластичных материалов, у которых слабо выражена область, где упругими деформациями можно пренебречь.

Малоцикловое разрушение в машиностроении связано в большинстве случаев со сравнительно редкими, но повторяющимися перегрузками: быстрыми запусками и остановками (двигатели, турбины, печи), периодическим срабатыванием аварийной защиты (атомные реакторы), тепловыми ударами в литейном и прокатном оборудовании, ударами в штампах, движением автомобилей по очень плохой дороге и т.д.

Критерии разрушения при многоцикловой усталости можно записывать как в напряжениях, так и в деформациях, поскольку они однозначно связаны законом Гука. При малоцикловой усталости использование напряжений в критериальных зависимостях чаще всего невозможно, поскольку за пределами упругости малому изменению напряжений может соответствовать значительное изменение деформаций, а

одним и тем же напряжениям могут соответствовать разные деформации в зависимости от истории и программы многократного нагружения. Поэтому критерии малоциклового разрушения удобнее записывать с использованием величин пластических деформаций, а не напряжений. В переходной (между многоцикловой и малоцикловой усталостью) области, когда необходимо учитывать влияние как упругих, так и неупругих деформаций, используются и силовые, и деформационные, и энергетические критерии.

Ограничимся пока простейшим случаем пластического деформирования при растяжении-сжатии без ползучести и без учета температурной зависимости свойств материала. Типичный вид диаграммы упруго-пластического деформирования в одной точке конструкции при циклическом нагружении показан на рис. 26 (изображены первый и один из последующих- k -тый цикл). Поведение материала определяется здесь эффектом Баушингера, циклическим упрочнением или разупрочнением материала (т.е. изменением размеров и формы петли гистерезиса с увеличением числа циклов), а также остаточными напряжениями в конструкции, образующимися при несовместности пластических деформаций.

Основными характеристиками процесса *пластического* деформирования в точке тела при циклическом изменении нагрузки с периодом T являются приращение пластической деформации за цикл

$$\Delta \varepsilon_p = \int_0^T \dot{\varepsilon}_p d\tau,$$

(здесь $\dot{\varepsilon}_p$ – скорость пластической деформации, τ – время от начала цикла) и размах пластической деформации за цикл

$$\delta \varepsilon_p = \varepsilon_{p \max} - \varepsilon_{p \min}.$$

Приращения и размахи пластических деформаций, а также форма и размеры петли пластического гистерезиса различны в разных точках конструкции и в общем случае изменяются от цикла к циклу. В первых циклах нагружения кон-

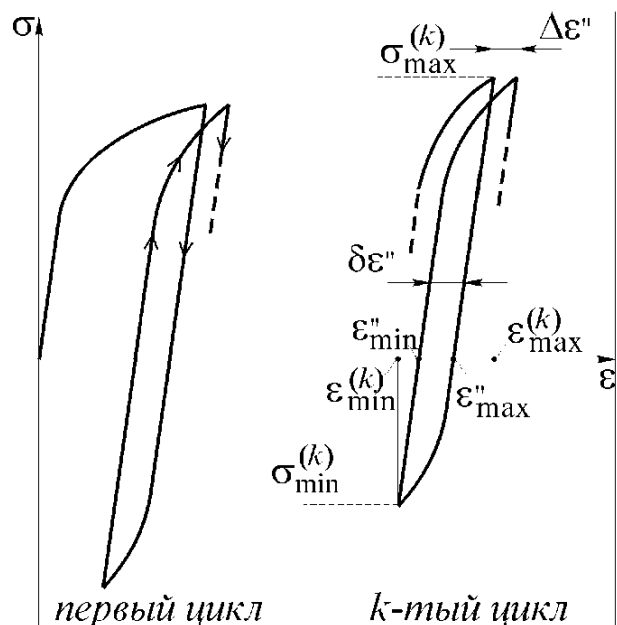


Рис. 26.

струкции они изменяются в связи с образованием остаточных напряжений и упрочнением или разупрочнением материала. Это – стадия приработки конструкции. После нее следует более или менее продолжительный период стабильной работы, когда приращения и размахи деформаций практически не меняются от цикла к циклу.

Непосредственно перед разрушением эти характеристики снова становятся переменными в связи с циклическим разупрочнением материала. При высоких нагрузках период стабильной работы может отсутствовать. Расчеты кинетики неупругого деформирования и экспериментальные измерения пластических деформаций позволяют определить длительность процессов приработки и предразрушения. Теоретически эти процессы являются асимптотическими по числу циклов, но с достаточной для практических целей точностью для многих конструкций, испытывающих за срок службы тысячи и десятки тысяч циклов, они оказываются в ряде случаев непродолжительными по сравнению с периодом стабильной работы.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВТОРНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В зависимости от величин приращений и размахов пластической деформации за цикл можно выделить три основных типа поведения конструкций: прогрессирующее формоизменение, знакопеременное пластическое течение и сочетание накопления деформаций и знакопеременного течения. В общем случае эта классификация относится ко всему сроку службы конструкции (стадиям приработки, стабильной работы и предразрушения). В тех случаях, когда ресурс конструкции определяется в основном периодом стабильной работы, рассматривают только приращения и размахи деформаций в стабильном цикле; при этом добавляется еще один тип поведения конструкций – упругая приспособляемость.

Упругая приспособляемость характеризуется полным прекращением пластического деформирования в макрообъемах после стадии приработки ($\dot{\epsilon}_p \equiv 0$ во всех точках конструкции) за счет образования благоприятных остаточных напряжений и стабилизации свойств материала. Если повреждения, накопленные в процессе приработки, невелики, то ресурс приспособившейся конструкции целиком определяется многоцикловой усталостью.

Прогрессирующим формоизменением называют такой процесс повторного пластического деформирования, в котором приращения пластических деформаций за цикл отличны от нуля, а размахи пластической деформации равны нулю;

$\Delta \varepsilon_p \neq 0$ в каких-либо точках конструкции,

$\delta \varepsilon_p \equiv 0$ во всех точках.

Необходимым условием реализации такого процесса (в отличие от состояния «мгновенного» предельного равновесия) является неодновременность пластического деформирования в разных точках конструкции в течение одного цикла. Наиболее отчетливо это необходимое условие реализуется при подвижных механических и тепловых нагрузках (колеса поездов и рельсы, технологические процессы прокатки и волочения, заполнение сосуда горячим теплоносителем и т.д.), но неодновременность пластического деформирования по объему возможна иногда даже при однопараметрической нагрузке (например – при циклическом нагружении одной сосредоточенной силой). Процесс накопления пластической деформации в одной из точек конструкции с увеличением числа циклов иллюстрирует схема (рис. 27), на которой изображены нагружение до определенной пластической деформации, упругая разгрузка, новое нагружение с увеличением пластической деформации.

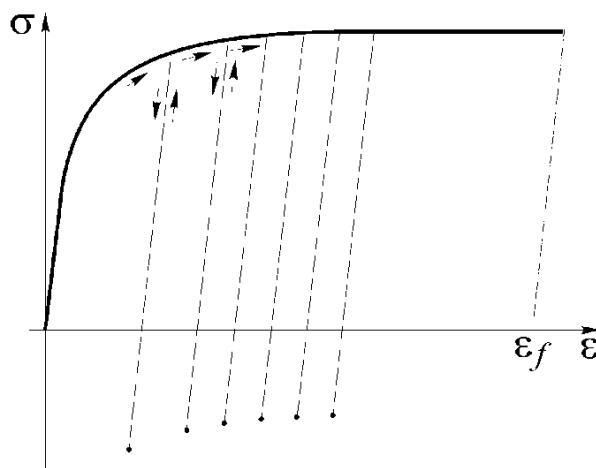


Рис.27

В каждом цикле такой процесс повторяется. В первом приближении можно считать, что линии разгрузки и следующего нагружения (до точки, с которой начиналась разгрузка) являются прямыми. Тогда накопление деформаций следует диаграмме статического однократного деформирования, показанной на рисунке жирной линией. При напряжениях, близких к пределу прочности материала, ползучесть может проявляться даже при нормальной температуре – тогда при разгрузке и повторном нагружении напряжения и деформации не связаны линейной зависимостью (накопление деформаций ускоряется), но диаграмма однократного статического нагружения (полученная при тех скоростях нагружения, которые реализуются в условиях эксплуатации)

по-прежнему остается основной характеристикой материала, определяющей в данном случае процесс деформирования.

Стабильное, непрекращающееся и одинаковое в ряде циклов накопление деформаций возможно только при отсутствии упрочнения материала. Неизменность остаточных напряжений от цикла к циклу в этом случае обеспечивается, если приращения чисто пластических деформаций за цикл удовлетворяют условиям совместности деформаций. Очевидно, что такой процесс не может быть локальным, он должен охватывать или всю деталь, или достаточно существенную ее часть.

Накопление деформации с увеличением числа циклов может привести в конце концов к исчерпанию ресурса пластичности материала и разрушению с образованием шейки (квазистатическому разрушению). Условие такого разрушения можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^{N_f} (\Delta \varepsilon_p)_i = \varepsilon_f.$$

Здесь $(\Delta \varepsilon_p)_i$ – приращение пластической деформации за цикл, N_f – число циклов до разрушения, ε_f – предельная (разрушающая) пластическая деформация.

Мерой повреждения, накопленной за заданное (меньшее разрушающего) число циклов N , в которых приращения деформаций $(\Delta \varepsilon_p)_i$ отличны от нуля, является отношение всей накопленной деформации к разрушающей:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \varepsilon_p)_i}{\varepsilon_f}.$$

Квазистатическое разрушение реализуется, когда эта мера равна единице.

Знакопеременное пластическое течение – это процесс циклического неупругого деформирования, при котором отличный от нуля размах пластических деформаций ($\delta \varepsilon_p \neq 0$) при нулевых приращениях деформаций ($\Delta \varepsilon_p \equiv 0$). В отличие от прогрессирующего формоизменения такой процесс может быть локальным, реализующимся в малом объеме.

Типичная для знакопеременного течения диаграмма показана на рисунке 28.

Процессы такого типа характерны прежде всего для локальных зон концентрации, где область пластического деформирования обычно

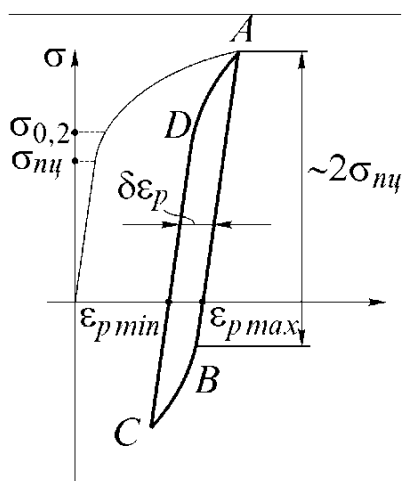


Рис. 28.

невелика по сравнению с размерами конструкции и окружена областью упругого деформирования.

Ширина петли пластического гистерезиса и форма этой петли могут меняться от цикла к циклу на стадиях приработки и предразрушения за счет изменения остаточных напряжений и циклического упрочнения (разупрочнения) материала.

Остаточные напряжения, образующиеся на стадии приработки конструкции, делают **стабильный** цикл знакопеременного течения симметричным (приращения пластических деформаций растяжения и сжатия в полуциклах одинаковы по величине). Такие напряжения всегда образуются, если этому не препятствуют граничные условия на поверхности детали и отсутствует прогрессирующее формоизменение. В результате стабильное знакопеременное течение реализуется в тех случаях, когда размах напряжений от внешних воздействий $\Delta\sigma^{(e)}$, вычисленных в предположении идеальной упругости материала, превышает длину упругого участка петли гистерезиса, т.е.

$$\Delta\sigma^{(e)} = \sigma_{\max}^{(e)} - \sigma_{\min}^{(e)} > 2\sigma_{нц}.$$

Здесь $\sigma_{нц}$ – предел пропорциональности при статическом нагружении.

Коэффициент 2 в этом соотношении соответствует идеальному эффекту Баушингера. Для циклически упрочняющихся материалов он может быть больше, а для разупрочняющихся – меньше двух. Поскольку предел пропорциональности обычно не приводится в сертификатах на материал, вместо него используют предел текучести; при этом условие существования стабильного знакопеременного течения принимает вид

$$\Delta\sigma^{(e)} > 2\sigma_{0,2}.$$

Погрешность такой замены компенсируется при расчете на долговечность соответствующим коэффициентом запаса.

Форма криволинейных участков *BC* и *DA* диаграммы деформирования существенно отличается от формы диаграммы однократного деформирования. Число циклов до образования усталостной трещины зависит от ряда факторов; наиболее значимым из них в малоцикловой области является размах пластической деформации за цикл.

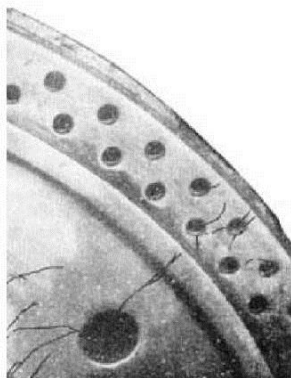
Знакопеременное пластическое течение характерно обычно для зон концентрации напряжений и деформаций. Оно является наиболее распространенным видом циклического неупругого деформирования конструкций. Можно отметить, что в процессе приработки конструкций отличны от нуля не только размахи, но и приращения пластических деформаций. Вызванные приращениями деформаций повреждения (статические повреждения) в зонах концентрации чаще всего настолько малы, что не влияют условия образования и развития трещины.

Закономерности малоциклового деформирования и разрушения материала в условиях знакопеременного течения, как и закономерности многоциклового усталости, определяются по результатам специальных испытаний. Такие испытания регламентированы стандартами (ГОСТ 16504-81, ГОСТ 25505-85, ГОСТ 23207-78 и др.), учитывающими ряд специфических различий малоциклового и многоциклового усталости.

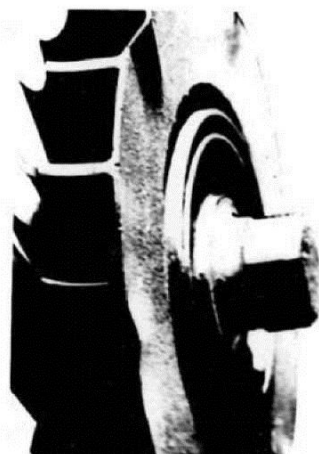
Сочетание накопления деформаций и знакопеременного течения – общий случай упругопластического деформирования, когда и приращения и размахи деформаций отличны от нуля. На характеристики диаграммы деформирования материала влияют как деформационное упрочнение, характерное для статического нагружения, так и циклическое упрочнение (разупрочнение). Вид диаграммы зависит от соотношения между приращениями и размахами деформаций и от числа циклов. Число циклов до образования макротрещины зависит как от статических, так и от циклических повреждений. Таким образом, для расчетного прогноза долговечности конструкции необходима экспериментальная информация о деформационных и прочностных свойствах материала в зависимости от соотношения между приращениями и размахами деформаций; причем на стадиях приработки и предразрушения эти приращения и размахи являются переменными. Получение (и удобное для расчетов представление) такой информации сталкивается со значительными трудностями. Во-первых, определение и кривых деформирования числа циклов до разрушения в зависимости от двух переменных и истории их изменения потребовало бы весьма большого объема испытаний. Во-вторых, испытания образцов необходимо проводить в условиях, когда приращение и размах деформации в одном цикле отличаются в десятки и сотни раз (только в этом случае статические и циклические повреждения оказываются соизмеримы) – это существенно затрудняет измерение деформаций. Общие методы таких испытаний пока не стандартизованы. Частным случаем являются испытания

в так называемом «мягком» цикле, когда поддерживаются постоянными максимальное и минимальное напряжения цикла и накопление деформаций определяется секундной ползучестью при напряжениях, близких к пределу прочности материала; такой цикл реализуется в реальной конструкции, только если она статически определима. При расчетах числа циклов до образования макротрещины обычно принимается поэтому какая-либо гипотеза суммирования статических и циклических повреждений, позволяющая обойтись только результатами статических испытаний и испытаний в условиях знакопеременного течения. В определенных границах, зависящих от материала и условий нагружения, такие гипотезы позволяют получить приемлемую точность расчетной оценки долговечности, если деформационные свойства материала, принятые в расчете, не слишком далеки от действительных.

Примеры малоциклового разрушения конструкций приведены ниже на фотографиях (рис.29).



Тещина малоцикло-
вой усталости в
диске турбины.



Прогрессирующий с числом циклов изгиб кромки радиальной турбины агрегата турбонаддува дизеля. Предельное состояние конструкции в данном случае – не образование трещины вследствие исчерпания пластических свойств, а задевание за корпус турбины



Чаша шлаковоза на Челябинском металлургическом заводе. После нескольких тысяч заливок горячего жидкого шлака в верхней части чаши образуется остаточное сужение (“чаша” превращается в “кувшин”) и образуются вертикальные и горизонтальные трещины

Рис. 29

2. ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ

Испытания металлов и сплавов при ненулевой ширине петли пластического гистерезиса проводятся при растяжении-сжатии и кручении при числе циклов до 10^5 в соответствии с ГОСТ 16504-81 и ГОСТ 25505-85. Целью испытаний является получение деформационных и прочностных характеристик материалов (в отличие от многоцикловых испытаний, в которых получают только прочностные характеристики).

При испытаниях на растяжение-сжатие используются образцы круглого поперечного сечения, трубчатые и сплошные, в том числе – корсетные. При испытаниях листовых материалов используются плоские образцы. Форма, размеры и способ изготовления образцов установлены стандартами. Вид различных образцов показан ниже на фотографиях (рис. 30, 31, 32).

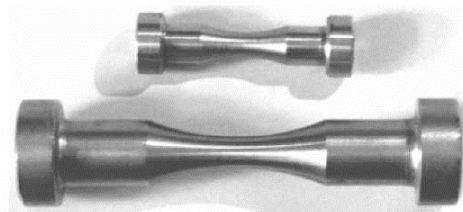


Рис. 30.

При испытаниях на кручение используются трубчатые цилиндрические образцы с толщиной стенки 2 мм и наружным диаметром не менее 18 мм.



Рис. 31.

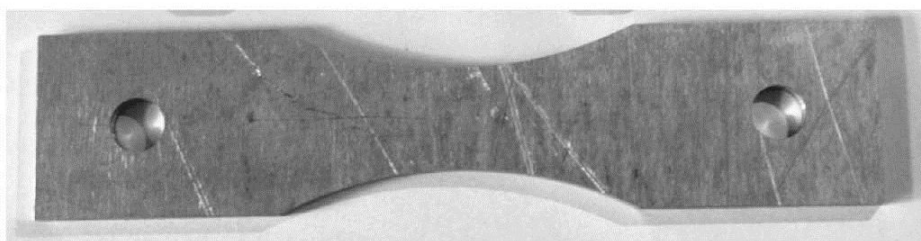


Рис. 32.

Для плоских образцов допускается проведение испытаний на циклический изгиб. Эти испытания, как в случае однократного статического нагружения, являются скорее технологической пробой (т.е. дают сравнительные оценки для разных материалов), чем методом определения свойств материала.

Машины и аппаратура для испытаний должны в общем случае обеспечивать возможность осуществления различных форм цикла нагружения, поддержание заданных значений управляемых параметров при изменении числа циклов и длительности испытаний, а также регистрацию результатов с точностью, установленной стандартом.

На фотографии показана одна из машин для испытаний корсетных образцов на малоцикловое растяжение-сжатие.



Рис. 33.

1 – деформометр; 2 – образец; 3 – машина УМЭ-10Т; 4 – двухкоординатный самописец.

Основным видом испытаний на малоцикловую усталость является растяжение-сжатие, основным типом нагружения-жесткий цикл (знакопеременное течение). Жесткий цикл (жесткое нагружение)-циклическое нагружение, при котором средние и амплитудные значения деформаций

сохраняют заданные значения. Управление процессом в жестком цикле ведется по деформациям: максимальная и минимальная полная или пластическая (в зависимости от выбранной программы) деформации цикла должны быть равны заданным постоянным значениям.

При испытаниях в мягком цикле поддерживаются заданные постоянные значения максимального и минимального напряжений цикла. Как отмечалось выше, это – частный случай сочетания накопления деформаций и знакопеременного течения. Результаты таких испытаний можно использовать при расчетах конструкций, если действительный цикл деформирования конструкции близок к мягкому, т.е. в процессе пластического деформирования напряжения не перераспределяются, например – при расчетах тонкостенных труб, нагруженных внутренним давлением.

Испытания на малоцикловую усталость проводят до момента образования поверхностной трещины размером 5...10% от диаметра образца (для $d = 1$ мм размер трещины 0,5...1 мм). В процессе испытаний записываются диаграммы деформирования образца (кривые нагрузка-деформация). Это делается либо во всех циклах нагружения, либо – по рекомендации ГОСТ – в 1...5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 1500 и т.д. – циклах. При испытаниях корсетных образцов на растяжение-сжатие измеряется поперечная деформация ε_{non} , которая пересчитывается затем в продольную ε . Для изотропных материалов этот пересчет ведется по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{\nu_p} \varepsilon_{p\,non} + \frac{1}{\nu_e} \varepsilon_{e\,non},$$

где $\varepsilon_{p\,non}$ и $\varepsilon_{e\,non}$ – пластическая и упругая составляющие поперечной деформации, ν_p и ν_e – коэффициенты поперечной деформации в пластической и упругой области. При отсутствии более подробных экспериментальных данных принимают $\nu_p = 0,5$; $\nu_e = 0,3$.

При испытаниях образца (как и любой конструкции) можно выделить стадии приработки, стабильной работы и предразрушения. На стадии приработки при постоянной максимальной и минимальной деформации (в жестком цикле) изменяются максимальные и минимальные напряжения цикла. Эти изменения зависят от исходного состояния образца. У образцов, закаленных до высокой твердости (или упрочненных другим способом) размах напряжений за цикл постепенно уменьшается. Это явление называют циклическим разупрочнением. У образцов из то-

го же материала, но термообработанного на низкую твердость, размах напряжений растет (циклическое упрочнение).

Диаграммы деформирования образцов:

а) – циклически разупрочняющийся материал;

б) – циклически упрочняющийся материал.

Цифры у кривых соответствуют номерам циклов

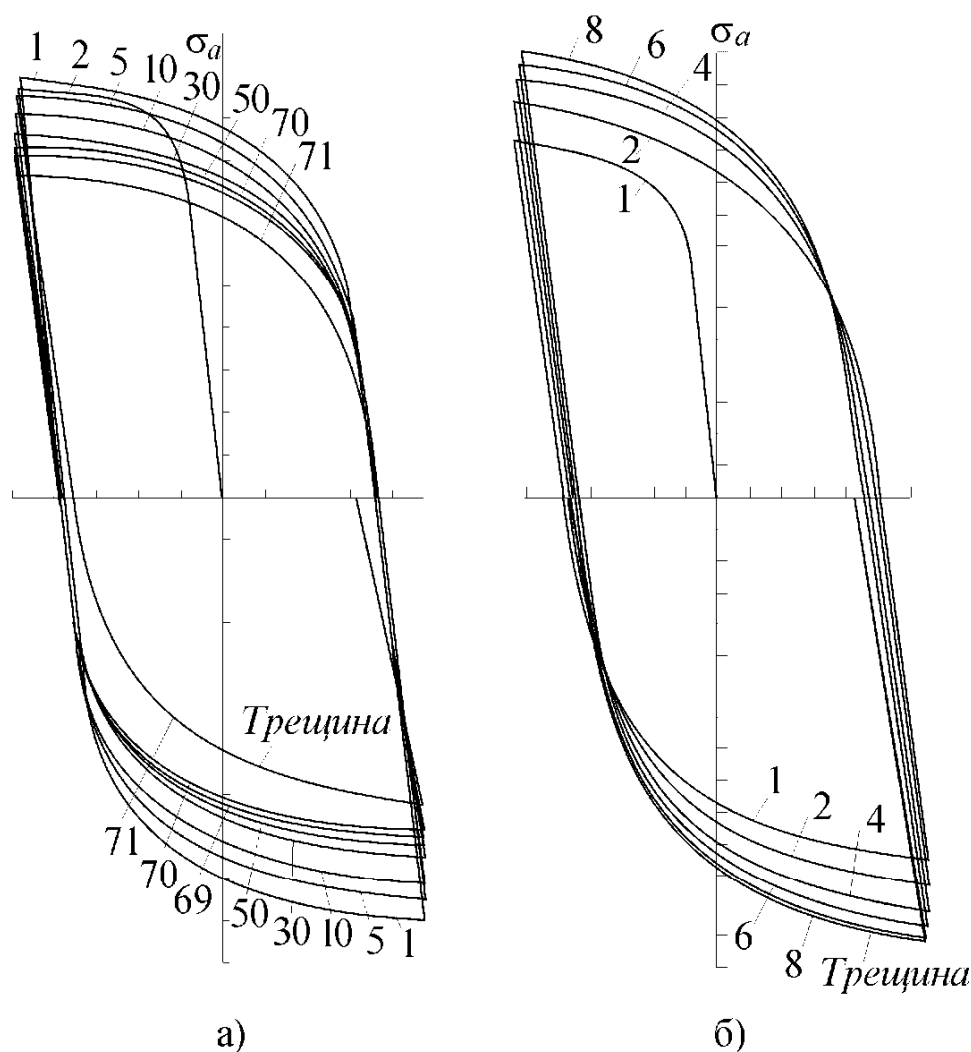


Рис. 34.

Стадия приработки для ряда материалов (например – стали 45, высокопрочного чугуна ВПЧНМ, нержавеющей стали Х18Н9Т) сменяется стадией стабильной работы. У некоторых широко применяемых материалов циклическое упрочнение или разупрочнение может продолжаться вплоть до разрушения (упрочняются, например, алюминиевые сплавы В - 96, Д - 16Т, АД-33, АК-8, сталь Х18Н9Т при высокой температуре; разупрочняются – теплоустойчивая сталь ТС, чугун ХНМ).

На стадии предразрушения у большинства материалов наблюдается циклическое разупрочнение. Эта стадия у некоторых материалов при жестком нагружении оказывается весьма длительной; в таких случаях стандартом допускается принимать число циклов до появления макротрещины равным числу циклов до падения напряжений (нагрузки) на 50% по сравнению с установившимся значением.

Количество образцов, подлежащих испытанию, выбирается в зависимости от разброса результатов. Для построения кривой усталости используется не менее 12 зачетных результатов на разных уровнях (не менее четырех уровней) параметров нагружения – размахов деформаций в жестком цикле или размахов напряжений – в мягком. Результаты испытаний (в жестком цикле – зависимость числа циклов до разрушения N_f от амплитуды пластической ε_{pa} , упругой ε_{ea} или полной ε_a деформации) изображаются на графике в двойных логарифмических координатах (рис. 35):

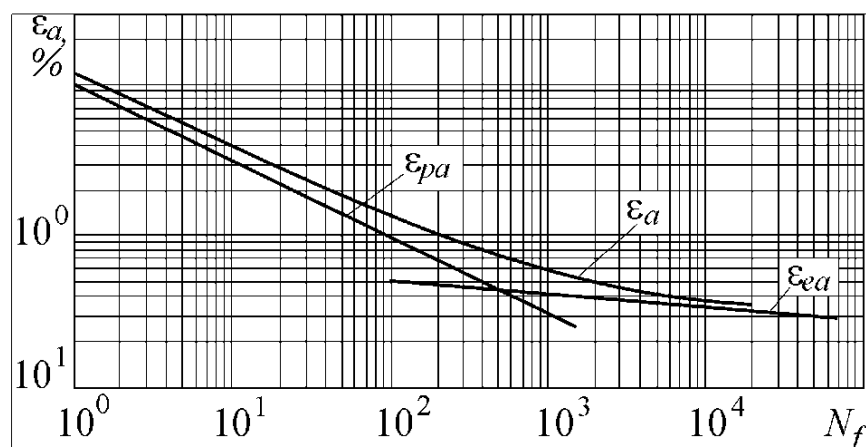


Рис. 35.

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ. КРИТЕРИИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В ЖЕСТКОМ ЦИКЛЕ

По результатам испытаний строят кривую усталости жесткого нагружения – зависимости среднего числа циклов до образования трещины N_f от амплитуды деформаций (пластических, полных или упругих). Для построения этой кривой данные испытаний при каждой заданной амплитуде деформаций обрабатываются по методу наименьших квадратов.

Кривая усталости схематизируется для последующих расчетов конструкций какой-либо аналитической зависимостью. Такая схематизация

должна отвечать двум противоречивым условиям. С одной стороны – выбранная аналитическая функция должна содержать как можно меньшее количество параметров (констант); это упрощает ее практическое применение и дает возможность построить кривую по минимальному набору экспериментальных данных. С другой стороны – выбранная аналитическая функция должна обеспечивать достаточно точное описание экспериментальных данных в возможно более широком диапазоне по числу циклов. Для выбора такой функции могут привлекаться какие-либо физические соображения или гипотезы, либо он выполняется на основе формального математического подхода – для практических приложений это не имеет значения.

Аналогичная ситуация рассматривалась в курсе сопротивления материалов при выводе критериев пластичности при сложном напряженном состоянии: критерии Треска-Сен-Венана и Мизеса-Хубера-Генки являются простейшей схематизацией опытных данных, позволяющей построить всю поверхность текучести только по результатам испытаний на растяжение. Один из этих критериев дает нижнюю оценку по сравнению с данными эксперимента, другой – верхнюю; различие не превышает 14%.

При многоцикловой усталости для описания зависимости между числом циклов до разрушения N_f и амплитудой упругой деформации ε_{ea} (или амплитудой напряжений σ_a) использовалась степенная функция

$$\varepsilon_{ea} = C_e N_f^{-m_e} \quad \text{или} \quad \sigma_a = (C_e E) N_f^{-m_e}.$$

При этом для описания кривой усталости достаточно в общем случае иметь две экспериментальных точки, по которым определяются значения констант C_e и m_e .

Аналогичную аппроксимирующую функции можно применить и в области малоцикловой усталости, где амплитудой упругих деформаций можно пренебречь и учитывать только амплитуду пластической деформации:

$$\varepsilon_{pa} = C_p N_f^{-m_p}.$$

Эту зависимость называют формулой Коффина.

Для определения констант m_p и C_p достаточно двух результатов испытаний, каждый из которых получается определением результатов испытаний нескольких образцов.

Для широкого круга сталей и сплавов величина m_p оказалась приблизительно равной двум. Если приближенно считать, что зависимость

Коффина справедлива при уменьшении числа циклов вплоть до однократного статического нагружения, то константу C_p при известном значении m_p можно определить по результатам испытаний на однократное растяжение. В этом случае $N_f = 1/4$ (нагружение до разрушения происходит в первой четверти первого цикла), амплитуда $\varepsilon_{pa} = 0,5 \varepsilon_f$, где $\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1-\psi}$ – истинная деформация в момент разрушения (ψ – относительное поперечное сужение в шейке образца после разрыва). Таким образом

$$C = \frac{1}{16} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^2$$

и тогда формула Коффина принимает вид

$$\varepsilon_{pa}^2 N_f = \frac{1}{16} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^2.$$

Отсюда, в частности, следует, что число циклов до образования трещины тем больше, чем больше пластичность материала, характеризуемая величиной ψ .

Приближенность двух принятых предположений ($m_p = 2$ и о справедливости зависимости во всем диапазоне малоциклового разрушения вплоть до разрушения в первом цикле) очевидна, поэтому при наличии соответствующих экспериментальных данных величины C_p и m_p следует определять более точно – по результатам испытаний при двух различных значениях ширины петли пластического гистерезиса.

В переходной – от малоцикловой к многоцикловой – области, когда следует учитывать как пластические, так и упругие деформации, схематизация экспериментальных данных степенной зависимостью принимает вид

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{pa} + \varepsilon_{ea} = A_p N_f^{-k_p} + A_e N_f^{-k_e}.$$

Здесь A_p , A_e , k_p , k_e – константы, в общем случае не совпадающие с C_p , C_e , m_p , m_e . Для определения этих констант необходимо иметь результаты испытаний при четырех различных значениях амплитуды полной деформации.

Таким образом, вся кривая усталости – как в малоцикловой, так и в многоцикловой области – описывается кусочно-степенной зависимостью, состоящей из трех участков, отвечающих различной роли упругих и пластических деформаций. Границы между этими участками оп-

ределяются из требований к точности соответствия экспериментальных данных и аппроксимирующей их степенной функции. В зависимости от разбросов результатов испытаний и требований к точности описания кривой усталости могут быть применены и другие аппроксимирующие функции. Кусочно-степенная зависимость получила сейчас наибольшее распространение, в частности – в опубликованных справочных данных по свойствам материалов.

В общем случае кривые малоциклового усталости (как и кривые многоциклового усталости) могут быть построены при различных значениях средней деформации цикла. Эта средняя деформация может быть получена при испытаниях в жестком цикле (при постоянных $\varepsilon_{\max}$ и $\varepsilon_{\min}$) за счет исходного нагружения в первом цикле. В большинстве реальных конструкций – в отличие от рассмотренных испытаний образцов – она накапливается с увеличением числа циклов. Испытания материалов в таких условиях, как отмечалось выше, связаны с большими трудностями и не стандартизованы. Поэтому кривые малоциклового усталости получают обычно для тех случаев, когда статические повреждения, обусловленные накопленной деформацией (средней деформацией цикла), невелики и ими можно пренебречь. Для пластичных сталей и сплавов это соответствует средней деформации цикла, не превышающей 1...2%.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Перейдем теперь к описанию полученной в результате испытаний на растяжение-сжатие диаграммы упруго-пластического циклического деформирования материала при жестком нагружении. Напомним, здесь рассматривается случай, когда температурно-временная зависимость свойств материала несущественна.

Рассмотрим вначале стабильное деформирование, при котором петля гистерезиса, изображенная ниже на рисунке, не изменяется от цикла к циклу.

Выделим на диаграмме деформирования (рис.36а) два полуцикла, разделенных моментами реверса (изменения знака) нагрузки – линии ABC и CDA . Эти две части диаграммы полностью характеризуют процесс деформирования. Для удобства их описания будем изображать кривые деформирования в полуциклах, считая началом координат момент реверса. Напряжение, отсчитываемое от этого момента, обозначим S , полную деформацию e . На рисунке 36(а) в точках A и C петли гистерезиса показаны направления координатных осей для двух полуциклов, а на рисунке 36(б) – диаграмма деформирования в полуцикле ABC в координатах S - e .

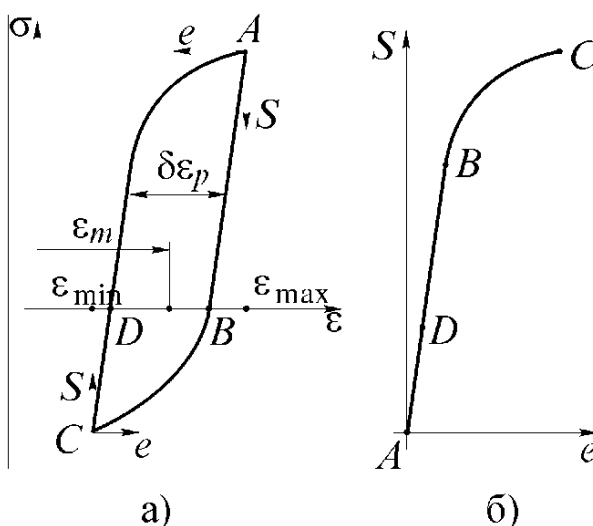


Рис. 36

Ограничимся случаем когда, накопленная в процессе приработки (стабилизации) деформация мала по сравнению с разрушающей при статическом нагружении: $\epsilon_m \ll \epsilon_f$.

Как показали испытания, проведенные для широкого круга материалов и условий нагружения в институте машиноведения РАН под руководством С.В.Серенсена и Н.А.Махутова, в рамках указанных выше ограничений с достаточной для практических целей точностью можно принять следующие два допущения:

- Кривые деформирования в координатах S - e для двух полуциклов одного и того же цикла одинаковы, т.е. в координатах S - e кривые ABC и CDA совпадают.
- Одним и тем же значениям напряжений S соответствуют одни и те же значения деформаций e независимо от ширины петли гистерезиса $\delta\epsilon_p$ и средней деформации цикла ϵ_m .

Таким образом, диаграмма деформирования S - e , построенная для максимальной ширины петли $\delta\epsilon_p^{\max}$, при которой проводились испытания, полностью характеризует деформационные свойства материала при $\delta\epsilon_p \leq \delta\epsilon_p^{\max}$.

Эту диаграмму (рис.37) называют обобщенной диаграммой циклического деформирования.

Этап стабильного деформирования, при котором петля гистерезиса не изменяется от цикла к циклу, охватывает лишь часть общего числа циклов до разрушения, а для материалов, циклически упрочняющихся или разупрочняющихся вплоть до разрушения, он вообще отсутствует. Диаграммы деформирования в процессе циклического упрочнения (рис. 37) не замкнуты (в отличие от стабильного цикла). Для двух полуциклов одного и того же цикла диаграммы в координатах S - e оказываются разными. С увеличением числа циклов они существенно изменяются (рис.39).

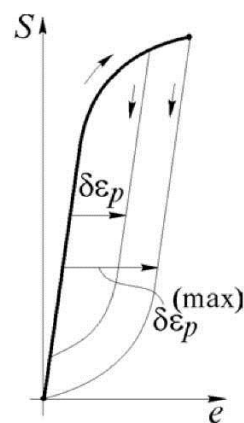


Рис.37

Экспериментальные данные показывают, что и для таких процессов деформирования в рамках указанных выше ограничений в одноименных полуциклах (отвечающих одинаковому знаку приращения нагрузки) одним и тем же значениям напряжений S соответствуют примерно одни и те же

значения деформаций e независимо от ширины петли пластического гистерезиса $\delta\epsilon_p$ и средней деформации цикла ϵ_m ; но эти напряжения и деформации зависят от числа циклов (или — что то же самое — от номера полуцикла). При этом для разноименных полуциклов одного и того же цикла диаграммы S - e различны. Таким образом, диаграмма S - e , построенная для четного и нечетного полуциклов при фиксированном числе циклов, является обобщенной диаграммой циклического деформирования, полностью характеризующей деформационные свойства материала при заданном числе циклов. Для разных чисел циклов эти диаграммы различны — в отличие от стабильного процесса деформирования.

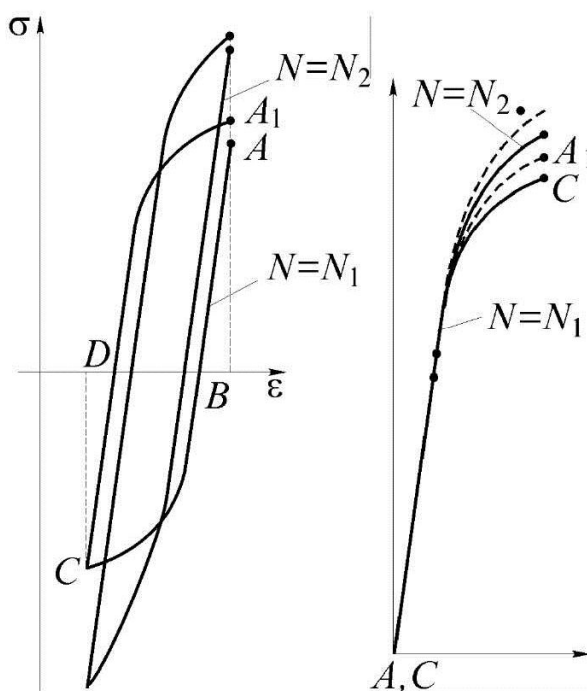


Рис. 38.

Рис. 39.

Любой конструкционный материал представляет собой сложную систему, состоящую из зерен, включений, связей между ними, пустот (пор). Эти составляющие имеют разные размеры и форму, различные механические свойства. При нагружении и разгрузке в этой системе образуются остаточные микронапряжения, развиваются или “залечиваются” микротрещины, может изменяться сама структура материала. Интегральным результатом этих процессов и является циклическое упрочнение или разупрочнение. Обобщенная диаграмма не отражает эти процессы в явном виде, она является лишь приближенным описанием результатов испытаний в заданных условиях. Поэтому такая диаграмма не пригодна для объяснения и прогнозирования деформационных свойств материала при существенном изменении условий нагружения, но в условиях, соответствующих проведенным испытаниям, она удобна для расчетов конструкций и обеспечивает достаточную их точность.

Существует (и применяется в промышленности) ряд способов описания деформационных свойств, в явном виде учитывающих роль структурной неоднородности, микротрещин и остаточных микронапряжений. Их практическое применение оправдано при сложных программах нагружения конструкций, которые трудно полностью воспроизвести при серийных испытаниях образцов, в частности – при существенном влиянии температурно-временной зависимости свойств материала.

5. РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Расчет конструкций ведется обычно с использованием двух коэффициентов запаса: по нагрузке и по долговечности, отвечающих различным программам перехода от заданных проектных (рабочих) условий к предельному состоянию.

Запас по нагрузке n_p показывает, во сколько раз нужно изменить расчетную (рабочую) нагрузку во все моменты времени цикла, чтобы она стала равна предельной при заданном проектном числе циклов N_p :

$$n_p = \frac{P^{(\tau)}_{разр}}{P(\tau)}, \quad 0 \leq \tau \leq T, \quad N = N_p.$$

В отличие от многоциклового усталости напряжения в конструкции в данном случае не пропорциональны нагрузке, поэтому нельзя записать n_p как отношение напряжений.

Запас по долговечности – это отношение расчетного разрушающего числа циклов N_f к проектному ресурсу N_p при заданных (эксплуатационных, рабочих) нагрузках:

$$n_N = \frac{N_f}{N_p}.$$

Эти два коэффициента запаса связаны сложной нелинейной зависимостью и высокое значение только одного из них не означает, что и второй велик. Нормативные значения запасов по нагрузке и долговечности различны. Например, в случае, когда предельным состоянием является образование макротрещины от знакопеременного течения, американские нормы прочности ядерных реакторов для электростанций устанавливают $[n]_p = 2$, $[n]_N = 20$.

Расчет фактических коэффициентов запаса включают конкретизацию понятия предельного состояния, поцикловый расчет приращений и размахов пластических и полных деформаций и определение условий достижения предельного состояния с помощью соответствующих критериев. При этом следует учитывать, что различным видам циклического пластического деформирования конструкций (прогрессирующему формоизменению, знакопеременному течению и их комбинации) отвечают не только различные последствия, но и существенно разные деформационные характеристики материала.

В условиях прогрессирующего формоизменения (когда приращение пластических деформаций за цикл отличны от нуля, а размахи равны нулю) предельное состояние конструкции определяется или появлением трещины вследствие исчерпания ресурса пластичности материала, или недопустимо большими остаточными перемещениями, накопившимися за ряд циклов. Деформационные свойства материала полностью характеризуются диаграммой однократного монотонного статического нагружения и законом разгрузки и повторного нагружения при нулевой ширине петли пластического гистерезиса (чаще всего – законом Гука).

В условиях знакопеременного течения предельным состоянием является образование усталостной трещины, а деформационные свойства материала характеризуются обобщенной кривой циклического деформирования. Циклическое упрочнение (разупрочнение), которое проявляется только на стадии приработки или вплоть до разрушения, может существенно влиять на диаграмму деформирования.

В общем случае, когда отличны от нуля и приращения и размахи пластических деформаций за цикл, а их соотношение может быть любым, справочные данные по деформационным свойствам отсутствуют. При малых по сравнению с ε_f накопленных деформациях диаграмма деформирования близка к обобщенной кривой; при малых по сравнению с единицей циклических повреждений она приближается к кривой однократного деформирования.

Если циклические и статические повреждения соизмеримы, то деформационные свойства должны определяться из специальных нестандартных испытаний. Исключение составляет мягкий цикл (испытания стандартизованы), который реализуется лишь в сравнительно редко встречающихся статически определимых конструкциях, работающих на растяжение-сжатие, например – в некоторых типах трубопроводов.

Размахи и приращения деформаций на стадии приработки существенно зависят от технологических остаточных напряжений в конструкции, образующихся при прокатке, ковке, штамповке, резании, термообработке. Так называемое “естественное” ненапряженное начальное состояние конструкции может быть получено только в результате специальной (как правило, длительной) термообработки, в остальных случаях технологические остаточные напряжения отличны от нуля и иногда могут быть весьма значительными. Эти напряжения крайне редко определяют расчетным путем на стадии проектирования. Чаще (но далеко не всегда) их определяют экспериментально, измеряя деформации при разрезке конструкции на части. При отсутствии данных о технологических остаточных напряжениях расчет процесса приработки в конструкции не может быть точным. Процесс приработки заканчивается, когда стабилизируются деформационные свойства материала, а границы пластических зон в конструкции перестают меняться от цикла к циклу за счет образования стационарного поля остаточных напряжений. При отсутствии ползучести этот процесс (теоретически – асимптотический по числу циклов) практически заканчивается после небольшого числа первых циклов, если, конечно, материал не является разупрочняющимся вплоть до разрушения. Накопленные при этом повреждения обычно невелики и расчет на прочность выполняется на основе анализа только стабильных циклов деформирования. Предположение о малости повреждений в процессе приработки проверяется экспериментально при доводочных испытаниях конструкции.

Расчет кинетики нестабильного и стабильного неупругого деформирования конструкций (кроме простейших) выполняется в настоящее время с помощью метода конечных элементов и реализующих этот метод специальных пакетов прикладных программ. Создание таких пакетов является весьма трудоемким и требует работы большого и квалифицированного коллектива. В каждом таком пакете предусмотрен ряд способов схематизации условий нагружения, геометрических характеристик конструкции и деформационных свойств материала. В зависимости от выбора этих способов пакеты специализированы для различных групп типовых задач. Их практическое применение при расчетах ответственных конструкций требует не только тщательной проверки точности, но и соответствующей регламентации нормативных коэффициентов запаса, поэтому, как правило, такие пакеты проходят процедуру официального утверждения – сертификации – отраслевой, национальной или международной. Метод конечных элементов позволяет в явном виде учесть реальную геометрию конструкции и определить напряженно-деформированное состояние во все моменты времени и во всех точках конструкции, в том числе – в зонах концентрации. В связи с этим при расчетах размахов и приращений деформаций не требуется введение теоретических коэффициентов концентрации.

Приведенный здесь краткий, весьма ограниченный и неполный обзор проблем малоциклового усталости является лишь введением в этот сложный и актуальный раздел механики. Большинство реальных задач расчета конструкций при малоцикловом нагружении связано с повышенными температурами и существенной температурно-временной зависимостью свойств материалов. В таких условиях на процессы неупругого деформирования и разрушения влияют не только размахи и приращения деформаций, но и форма цикла, программа нагружения, изменение температуры. В условиях знакопеременного течения деформационные свойства материала существенно зависят от взаимного влияния деформаций ползучести и кратковременных пластических деформаций разных знаков; критерии образования трещин существенно усложняются с учетом различного влияния ползучести и кратковременного пластического деформирования, знака деформации ползучести и других факторов. При анализе условий прогрессирующего формоизменения необходимо учитывать возможность потери устойчивости процессов неупругого деформирования. В тех случаях, когда на разрушение конструкции влияют и приращения и размахи деформаций за цикл, необ-

ходимо проведение специальных нестандартных испытаний материалов. Информация по этим проблемам выходит за пределы данного учебного курса и требует работы с соответствующими монографиями и статьями.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Дайте определение основных понятий, которые рассматривались в данном разделе:

- малоцикловая усталость;
- знакопеременное течение, прогрессирующее формоизменение и их сочетание;
- приспособляемость конструкций;
- процессы приработки, стабильного деформирования и предразрушения материала и конструкции.

2. Запишите критерий образования трещины при накоплении статических повреждений.

3. Какие деформационные характеристики материала используются при расчете процесса прогрессирующего формоизменения? Как обосновать применение именно этих критериев?

4. На каких образцах и как проводятся испытания материалов на малоцикловую усталость? Какие характеристики фиксируются в процессе испытаний и как представляются результаты испытаний?

5. Запишите критерий Коффина и укажите границы его применимости.

6. Запишите критерий образования трещины в переходной (от малоцикловой к многоцикловой) области и укажите границы его применимости.

7. Дайте определение обобщенной диаграммы циклического деформирования и границ ее применимости.

8. При каком условии в конструкции реализуется знакопеременное пластическое течение?

9. Какова роль технологических остаточных напряжений в процессах малоциклового неупругого деформирования?

10. Какова роль остаточных напряжений, образующихся при приработке конструкции, в процессе последующего циклического пластического деформирования?

Примерные экзаменационные вопросы прошлых лет

1. Малоцикловая усталость. Классификация предельных состояний и условия их достижения.

2. Знакопеременное пластическое течение. Критерии образования трещин.

3. Характеристики материалов при знакопеременном пластическом течении

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО РАЗДЕЛУ

1. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Справочное пособие. М., Машиностроение, 1975. 488 с.
2. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М., Машиностроение, 1981.