ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

РАСЧЕТЫ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ (УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ)

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Волгоград 1996

УДК 539.3

Савкин А.Н. Расчеты элементов машин и конструкций на выносливость при переменных нагрузках: Учеб. пособие/ ВолгГТУ, Волгоград, 1996. - 48 с.

Приводятся результаты анализа и обобщения по разделу "Усталость металлов", предусмотренному типовой программой курса.

Задачи и индивидуальные задания на выполнение курсовой работы раскрывают существо инженерных задач данного класса. Рассмотрены примеры решения типовых задач по расчету на выносливость элементов машин и конструкций при переменных нагрузках и задачи для самостоятельго решения. Приведены литературные источники, ориентирующие на более глубокое изучение материала по данной тематике.

Даются рекомендации по использованию автоматизированной подсистемы "Ustmet" при расчете на выносливость.

Ил. 8. Табл. 6. Библиогр.: 13 назв.

Рецензент: И.Н. Носко, кафедра "Машиноведение" Волгоградского государственного педагогического университета

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского государственного технического университета

© Волгоградский государственный технический университет, 1996

JSBN 5-230-03704-0

1. РАСЧЕТЫ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ (УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ)

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗДЕЛА "УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ"

Одной из актуальных проблем современного машиностроения является проблема повышения долговечности элементов машин по критериям прочности при одновременном снижении их металлоемкости. Непрерывное увеличение мощностей, скоростей, грузоподъемности, производительности и других параметров машин и связанный с этим рост напряженности элементов приводит к тому, что указанную проблему можно решить лишь при использовании в процессе конструирования и расчета новейших достижений науки о прочности.

Выбор материала, определение формы и размеров деталей должны основываться на знании предельных состояний и критериев прочности для заданного характера изменения нагрузок, температур, влияния окружающей среды и других факторов.

При многоцикловом усталостном разрушении существенное значение имеет учет рассеяния усталостной долговечности на стадии образования и роста трещины и расчет долговечности по параметру вероятности разрушения.

Для расчета функций распределения ресурса необходимо знать средние значения и коэффициенты вариации пределов выносливости натурных деталей. Используемые для этого методы основываются на статистической теории подобия усталостного разрушения. Рассмотренные методы расчета усталостной прочности элементов конструкций и деталей машин широко используются в промышленности.

1.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛА "УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ"

1.2.1. Самостоятельному изучению теоретического материала должна предшествовать установочная лекция и составление студентом ее конспекта в рабочей тетради.

1.2.2. В соответствии с рекомендациями преподавателя, необходимо ознакомиться с теоретическим материалом, привлекая для этого литературу [1...5] (смотрите список рекомендуемых источников и указанные страницы для самостоятельной проработки).

1.2.3. Изучение учебного пособия позволяет успешно освоить курс "Сопротивление материалов - усталость металлов" и выполнить в отведенные сроки расчетно-проектировочную работу N 8 "Расчет на прочность при переменном нагружении".

1.2.4. Отвечая на вопросы, приведенные в разделе 1.4., проверьте себя, насколько твердо усвоен основной теоретический материал.

1.2.5. Прежде чем приступить к решению задач, ознакомьтесь с предлагаемой общей методикой их решения, изложенной в разделе 1.5.

1.2.6. В разделе 1.6. даются три примера простейших типовых расчетов на выносливость. Обратите внимание на предлагаемую последовательность выполнения отдельных операций при проведении расчетов. Необходимо убедиться, что решение таких задач не вызывает у вас никаких сложностей. Занесите ход решений 3 задач в вашу рабочую тетрадь для проработки теоретического материала.

1.2.7. Выполнение восьмой расчетно-проектировочной работы "Расчет на прочность при переменном нагружении" должно основываться на требованиях ГОСТ 25.504-82 "Расчеты и испытания на прочность". Требования ГОСТ к оформлению расчетных работ приведены в пособии [6]. Правильное использование в расчетах размерностей величин и их обозначения дается в пособии [7], где обсуждаются основные вопросы стандартизации в курсе сопротивления материалов.

1.3. РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

1.3.1. Основные положения. Параметры переменного нагружения. Характеристики усталостной прочности

Как установлено практикой, в случае действия на элементы конструкций нагрузок, периодически изменяющихся во времени и по величине или по величине и направлению, разрушение металла происходит при напряжениях, значительно меньших предельных значений. С подобными действиями приходится встречаться, как правило, при расчетах движущихся элементов машин и механизмов: коленчатых и торсионных валов, клапанных пружин, кривошипно-шатунных механизмов.

Нагрузки, вызывающие появление в поперечных сечениях периодически изменяющихся напряжений, называются циклическими нагрузками. Совокупность всех значений напряжений за время одного периода их изменения носит название цикла напряжений. Частота изменений напряжений характеризуется числом циклов в единицу времени, а продолжительность цикла во времени определяет период цикла.

Характер разрушения материала от воздействия на него циклических нагрузок существенно отличается от характера разрушения при статических нагрузках. Разрушение начинается обычно с образования микротрещин, которые прогрессивно развиваются вглубь материала, уменьшая, тем самым, площадь поперечного сечения детали. Разрушение всегда происходит внезапно, после того как площадь сечения сократится настолько, что не может выдержать заданной нагрузки.

Явление разрушения материала от действия переменных напряжений называют усталостью материала. Способность материала воспринимать многократное действие переменных напряжений без разрушения носит название выносливости или циклической прочности.

Максимальные переменные напряжения, при которых материал способен сопротивляться не разрушаясь, называют пределом выносливости.

1.3.1.1. Законы изменения переменных напряжений могут быть самыми разнообразными, но наибольший интерес представляет случай изменения их во времени по синусоидальному закону.

Основными параметрами цикла являются: наибольшее σ_{max} и наименьшее σ_{min} (в алгебраическом смысле) напряжение цикла: среднее напряжение

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \qquad (1.1)$$

амплитуда цикла

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \qquad (1.2)$$

коэффициент асимметрии цикла

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}. \qquad (1.3)$$

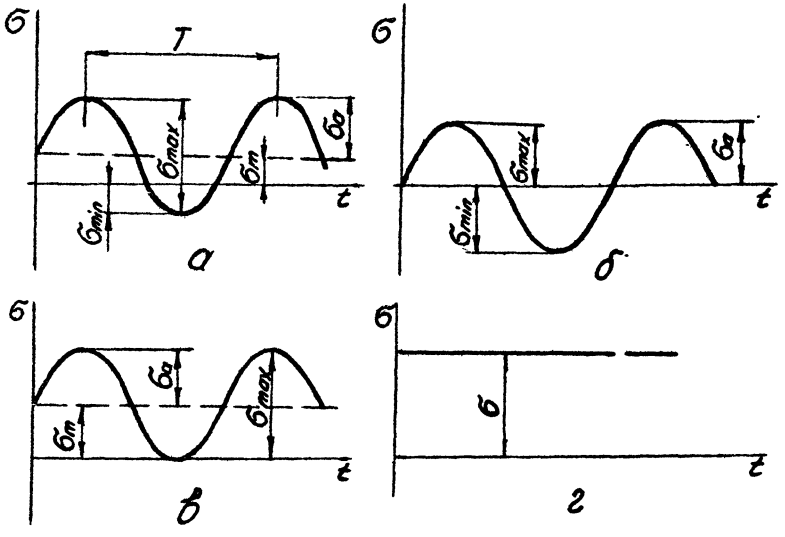


Рис. 1

Из приведенных выражений следует, что

$$\sigma_m + \sigma_a = \sigma_{max}, \quad \sigma_m - \sigma_a = \sigma_{min}.$$

Если $$\sigma_{max} = \sigma, \quad \sigma_{min} = -\sigma, \qquad (1.4)$$

то имеем симметричный цикл напряжений (рис. 1б), для которого

$$\sigma_m = 0, \quad \sigma_a = \sigma, \quad R_\sigma = -1.$$

Цикл напряжений, показанный на рис. 1в, называют пульсирующим (или отнулевым) циклом. Для него

$$\sigma_{max} = \sigma, \quad \sigma_{min} = 0, \quad \sigma_m = \sigma_a = \sigma/2, \quad R_\sigma = 0.$$

Постоянное статическое напряжение (рис. 1г) можно рассматривать как частный случай переменного цикла с параметрами

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} = \sigma, \quad \sigma_m = \sigma, \quad \sigma_a = 0, \quad R_\sigma = 1.$$

В отличие от симметричного, все другие знакопеременные циклы называются асимметричными. На рис. 1а показан асимметричный цикл напряжений.

Из рассмотренных циклов напряжений наиболее опасным является симметричный цикл, поскольку именно для него предел выносливости имеет минимальное значение.

В случае переменных касательных напряжений остаются в силе все приведенные выше термины и соотношения с заменой σ на τ.

1.3.1.2. Величина предела выносливости при циклическом нагружении определяется по кривой выносливости (рис.2), которая строится на основании опытных данных. Для этого изготавливают серию одинаковых образцов, каждый из которых подвергают действию переменных напряжений. Целью испытания является определение числа циклов N, при котором разрушается каждый образец. Горизонтальная ассимптота, к которой стремится кривая выносливости, носит название предела выносливости σ_R. При симметричном цикле $R_\sigma=-1$, а потому $\sigma_R = \sigma_{-1}$.

Построение кривой выносливости и определение предела выносливости по результатам усталостных испытаний лабораторных образцов.

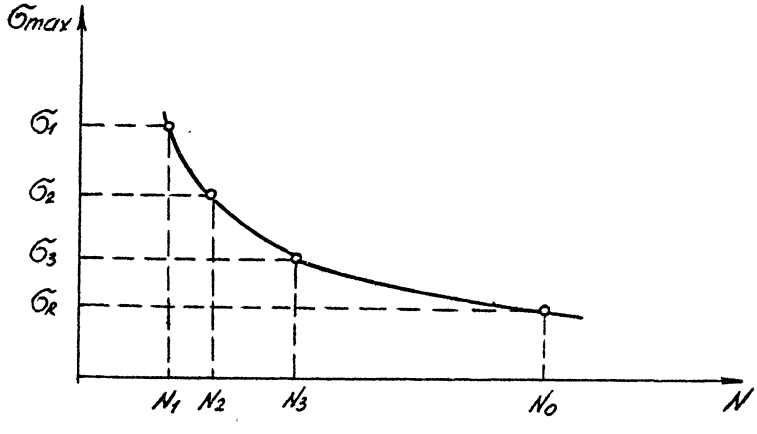


Рис. 2

Определение предела выносливости материала при различных асимметриях цикла по кривой предельных амплитуд:

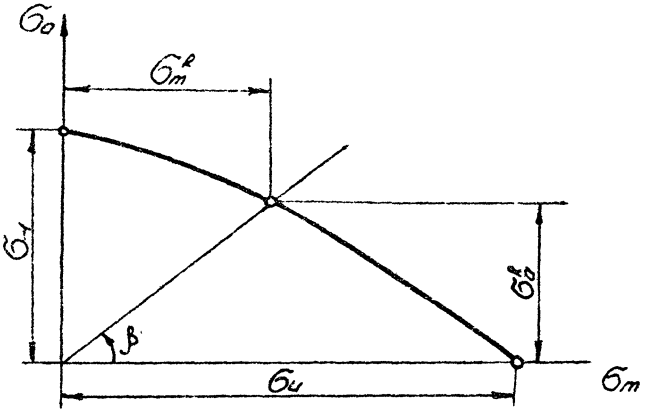


Рис. 3

Для черных металлов за предел выносливости принимают предельное значение наибольшего напряжения, при котором не происходит разрушение после прохождения 10^7. Это число циклов называют базовым и обозначают N_0. Для цветных металлов и закаленных сталей $N_0 = 10^8$ циклов.

При изучении раздела "Усталость металлов" выполняется лабораторная работа "Испытание металлов на выносливость" [8].

Установлены следующие приближенные соотношения между пределами выносливости при симметричном цикле в случае изгиба σ_{-1}, осевого растяжения-сжатия σ_{-1p}, кручения τ_{-1} и пределом прочности σ_u:

для стали $\sigma_{-1} \approx \sigma_u(0,4-0,6)$, $\sigma_{-1p} = (0,7-0,8)\sigma_{-1}$,
$\tau_{-1} = (0,4-0,7)\sigma_{-1}$,

для чугуна $\sigma_{-1} \approx (0,4-0,5)\sigma_u$, $\tau_{-1} = (0,7-0,9)\sigma_{-1}$,

цветных металлов $\sigma_{-1} \approx (0,25-0,5)\sigma_u$.

1.3.1.3. При асимметричном цикле предел выносливости можно определить по опытной кривой предельных амплитуд (диаграмма

Хэйя), построенных в координатах σ_m-σ_a (рис.3). На рис.3 σ_u - обозначает предел прочности материала при данном виде деформации тела. Для заданной характеристики цикла R_σ устанавливают величину $tg\ \beta=\sigma_a/\sigma_m=(1-R)/(1+R)$ и угла β. Из начала координат под углом β к оси σ_m проводим прямую. Складывая координаты (σ_m и σ_a) точки пересечения прямой и кривой, находят предел выносливости

$$\sigma_R = \sigma_m^R + \sigma_a^R \qquad (1.5)$$

Можно оценивать предел выносливости материала при асимметричном нагружении и по опытной кривой, построенной в координатных осях $\sigma_{\substack{max\\min}}$-$\sigma_m$ (диаграмма Смита).

Диаграмма Смита строится по трем режимам нагружения материала (рис.4). Первый режим нагружения - $R_\sigma=-1$, $\sigma_{max}=\sigma_{-1}$, $\sigma_{min}=-\sigma_{-1}$, $\sigma_m=0$ (рис.4, точки 1). Второй режим нагружения - отнулевой цикл нагружения $R=0$, предельные значения $\sigma_{max}=\sigma_o$, $\sigma_{min}=0$, $\sigma_m=\sigma_o/2$ (рис.4, точки 2) и третий режим нагружения - растяжение $R_\sigma=1$, где предельное напряжение $\sigma_{max}=\sigma_{min}=\sigma_u$; $\sigma_m=\sigma_u$ (рис.4, точка 3).

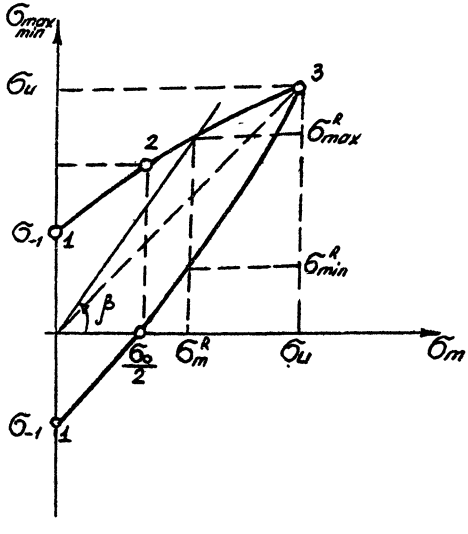


Рис. 4

Для заданной характеристики цикла R_σ устанавливают величину $tg\,\beta = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{2}{1 + R}$ и угла β. Из начала координат проводят прямую под этим углом, пересечение ее с диаграммой Смита дает значение предельного напряжения σ^{k}_{max}, опуская перпендикуляр на ось абсцисс и пересекая вторую ветвь диаграммы Смита, определим σ^{k}_{min}, а на оси абсцисс σ^{k}_{m}.

Влияние асимметрии цикла на выносливость материала оценивают коэффициентом асимметрии

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \qquad (1.6)$$

где σ_0 - предел выносливости лабораторных образцов при отнулевом цикле ($R_\sigma = 0$).

1.3.2. Факторы, влияющие на сопротивление усталости деталей машин

Номинальными называют напряжения, вычисленные по обычным формулам сопротивления материалов:

$$\sigma_н = \frac{F}{A}, \qquad \sigma_н = \frac{M}{W_{oc}}, \qquad \tau_н = \frac{T}{W_p}, \qquad (1.7)$$

где F, M, T -соответственно сила, изгибающий и крутящий моменты; A, W_{oc}, W_p - соответственно площадь, осевой и полярный моменты сопротивления поперечного сечения детали.

Первую из приведенных формул применяют при растяжении или сжатии, вторую -при изгибе и третью при кручении элементов. Для оценки характеристик сопротивления усталости натурных деталей (например, осей железнодорожных вагонов, коленчатых валов, сварных соединений и т. д.) проводят их усталостные испытания, в результате которых определяют предел выносливости детали σ_{σ}, выраженный в номинальных напряжениях. При испытании достаточно

большого числа деталей возможно определение среднего (медианного) значения предела выносливости детали $\bar{\sigma}_{-1g}$ на множестве всех плавок металла данной марки.

Значения $\bar{\sigma}_{-1g}$ обычно в 2-6 (и более) раз меньше, чем характеризующее только свойства материала среднее значение предела выносливости σ_{-1} гладких лабораторных полированных образцов.

Эта разница характеризуется коэффициентом снижения предела выносливости К, отражающего влияние всех факторов на сопротивление усталости.

$$\sigma_{-1g} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{K} \quad (I.8), \qquad \bar{\sigma}_{-1} = K_1 \bar{\sigma}'_{-1} \quad (I.9),$$

где

$\bar{\sigma}_{-1}$ - среднее значение предела выносливости на совокупности всех плавок металла данной марки гладких лабораторных образцов d_0 = 7,5 мм, изготовленных из заготовок диаметром d, равным абсолютному размеру рассчитываемой детали;

$\bar{\sigma}'_{-1}$ - среднее значение предела выносливости на совокупности всех плавок металла данной марки гладких лабораторных образцов диаметром d_0 =7,5 мм, изготовленных из заготовок размерами 10-20 мм;

K_1 - коэффициент, учитывающий снижение механических свойств металла ($\sigma_u, \sigma_y, \sigma_{-1}$) с ростом размеров заготовок.

Для легированных сталей

$$K_1 = 1 - 0,2 \lg \frac{d}{d_0} \quad \text{для} \quad d \leqslant 150 \text{ мм}, \quad (I.10)$$

где d_0=7,5 мм - диаметр гладкого лабораторного образца;

K_1 = 0,74 для $d > 150$ мм.

Для углеродистых сталей K_1= 1.

Коэффициент К рекомендуется по ГОСТ 25.504-82 определять по формулам:

при растяжении-сжатии и изгибе

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1\right)\frac{1}{K_v \cdot K_A}, \quad (1.11)$$

при кручении

$$K = \left(\frac{K_\tau}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1\right)\frac{1}{K_v}. \quad (1.12)$$

Коэффициенты, входящие в выражение для К, учитывают влияние на сопротивление усталости следующих факторов:

концентрацию напряжений (K_σ, K_τ);

масштабный фактор или влияние абсолютных размеров поперечного сечения ($K_{d\sigma}$, $K_{d\tau}$);

качество обработки поверхности ($K_{F\sigma}$, $K_{F\tau}$);

эксплуатационные факторы (температуру, коррозию, частоту нагружения, облучение и др.);

анизотропию прочностных свойств материала K_A;

технологические методы поверхностного упрочнения деталей (K_v); поверхностное пластическое деформирование (ППД), химико-термическую обработку (цементацию, азотирование, цианирование и др.), закалку ТВЧ, лазерное облучение, плазменное напыление поверхностного слоя.

1.3.2.1. Влияние концентрации напряжений

Концентрацией напряжений называют увеличение напряжений в местах резкого изменения очертания размеров детали по сравнению с номинальными. Уровень концентрации напряжений характеризуется теоретическими коэффициентами концентрации для нормальных α_σ и касательных α_τ напряжений

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_н}, \qquad \alpha_\tau = \frac{\tau_{max}}{\tau_н}. \tag{1.13}$$

На рис. 5 показано распределение напряжений в пластине с боковыми надрезами, поясняющее смысл коэффициента α_σ.

Для расчета на выносливость существенное значение имеет также относительный градиент первого главного напряжения

$$\bar{G} = \frac{G}{\sigma_{max}} = \frac{1}{\sigma_{max}}\left[\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right]_{x=a} = A\,tg\,\beta\left[\frac{1}{мм}\right]. \tag{1.14}$$

Градиент характеризует быстроту снижения напряжений по мере увеличения расстояния от поверхности; он пропорционален тангенсу угла β наклона касательной к эпюре напряжений при x=a. А в формуле (1.14) – коэффициент пропорциональности, зависящий от масштабов по осям координат. Формулы для подсчета градиентов напряжений приведены в табл. 1.

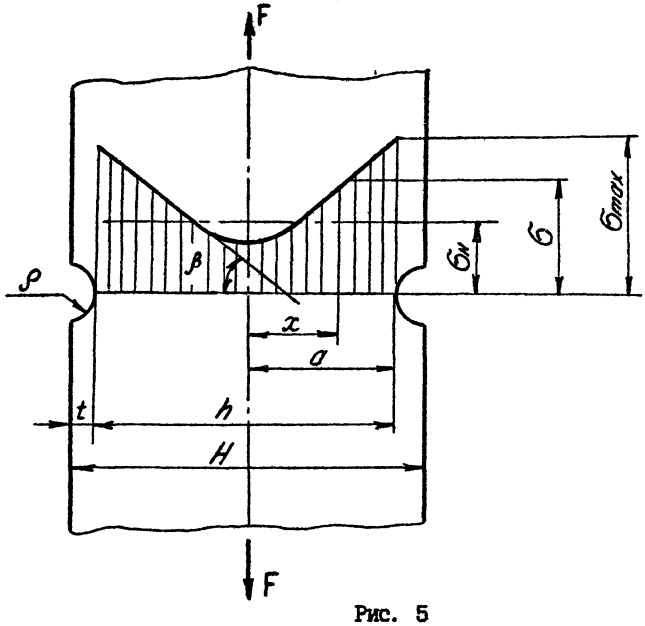


Рис. 5

Фактическое снижение пределов выносливости вследствие концентрации напряжений оценивают с помощью эффективных коэффициентов концентрации напряжений $K_{\sigma(d_p)}$, $K_{\tau(d_p)}$, равных отношению пределов выносливости $(\sigma_{-1})_{d_p}$, $(\tau_{-1})_{d_p}$ гладких (без концентрации напряжений) образцов с абсолютными размерами поперечного сечения d_p к пределам выносливости образцов с концентрацией напряжений $(\sigma_{-1g})_{d_p}$, $(\tau_{-1g})_{d_p}$ такого же размера d_p:

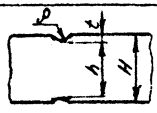
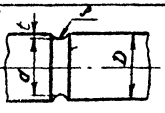
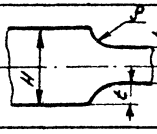
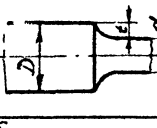
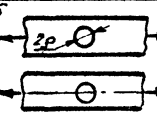
$$K_{\sigma(d_p)} = \frac{(\sigma_{-1})_{d_p}}{(\sigma_{-1g})_{d_p}}, \qquad K_{\tau(d_p)} = \frac{(\tau_{-1})_{d_p}}{(\tau_{-1g})_{d_p}}. \qquad (1.15)$$

Индекс d_p введен в формулы (1.15), чтобы подчеркнуть необходимость соблюдения равенства основного размера образцов гладких и с концентратором напряжений, в связи с влиянием на величину масштабного фактора.

Так как трудоемкость определения величин K_σ и K_τ (для чего требуется проведение усталостных испытаний (во много раз превышает трудоемкость определения a_σ и a_τ, то целесообразно установить зависимость между этими коэффициентами.

Таблица 1

Формулы для определения градиентов напряжений $\bar{G}$ в зависимости от вида нагружения

Деталь	Соотношение размеров	Изгиб	Растяжение сжатие	Кручение
1 	$\frac{H}{h} \geqslant 1,5$	$\bar{G}=\frac{2}{\rho}+\frac{2}{h}$	$\bar{G}=\frac{2}{\rho}$	—
	$\frac{H}{h} < 1,5$	$\bar{G}=\frac{2(1+\varphi)}{\rho}+\frac{2}{h}$	$\bar{G}=\frac{2(1+\varphi)}{\rho}$	—
2 	$\frac{D}{d} \geqslant 1,5$	$\bar{G}=\frac{2}{\rho}+\frac{2}{d}$	$\bar{G}=\frac{2}{\rho}$	$\bar{G}_\tau=\frac{1}{\rho}+\frac{2}{d}$
	$\frac{D}{x} < 1,5$	$\bar{G}=\frac{2(1+\varphi)}{\rho}+\frac{2}{d}$	$\bar{G}=\frac{2(1+\varphi)}{\rho}$	$\bar{G}_\tau=\frac{1}{\rho}+\frac{2}{d}$
3 	$\frac{H}{h} \geqslant 1,5$	$\bar{G}=\frac{2,3}{\rho}+\frac{2}{h}$	$\bar{G}=\frac{2,3}{\rho}$	—
	$\frac{H}{h} < 1,5$	$\bar{G}=\frac{2,3(1+\varphi)}{\rho}+\frac{2}{h}$	$\bar{G}=\frac{2,3(1+\varphi)}{\rho}$	—
4 	$\frac{D}{d} \geqslant 1,5$	$\bar{G}=\frac{2,3}{\rho}+\frac{2}{d}$	$\bar{G}=\frac{2,3}{\rho}$	$\bar{G}_\tau=\frac{1,15}{\rho}+\frac{2}{d}$
	$\frac{D}{d} < 1,5$	$\bar{G}=\frac{2,3(1+\varphi)}{\rho}+\frac{2}{d}$	$\bar{G}=\frac{2,3(1+\varphi)}{\rho}$	$\bar{G}_\tau=\frac{1,15}{\rho}+\frac{2}{d}$
5 	—	—	$\bar{G}=\frac{2,3}{\rho}$	

Примечание. $\varphi = 1/(4\sqrt{t/\rho}+2)$.

В приближенных расчетах можно принять:

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1), \quad K_\tau = 1 + q(\alpha_\tau - 1), \qquad (1.16)$$

где q - коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений, имеющих значения 0 - 1.

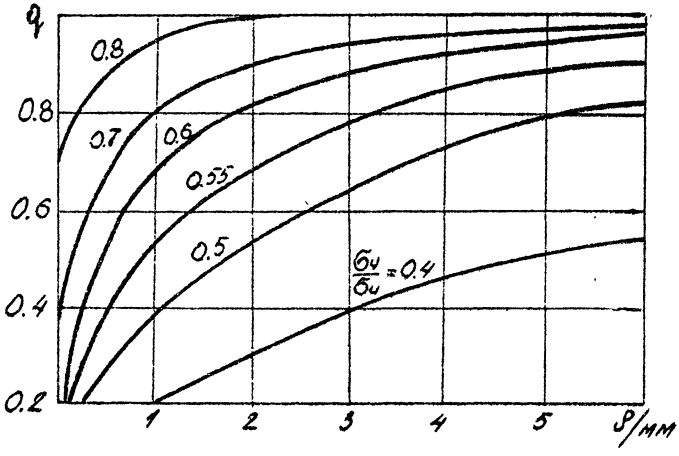


Рис. 6

На рис. 6 приведены значения q для стали в зависимости от радиуса кривизны в зоне концентрации ρ и отношения предела текучести σ_y к пределу прочности σ_u.

Другой подход, принятый в стандарте ГОСТ 25.504-82, согласно которому

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{n}, \qquad K_\tau = \frac{\alpha_\tau}{n}, \tag{1.17}$$

$$n = 1 + \sqrt{G} \cdot 10^{-\left(0,33 + \frac{\sigma_y}{712}\right)}, \tag{1.18}$$

где $\bar{G}$ - относительный градиент напряжений, мм$^{-1}$,

σ_y - предел текучести, МПа.

Коэффициенты α_σ, α_τ определяют по теоретическим решениям или на основе измерений с помощью поляризационно - оптического метода, тензометрирования и т. п.

При обработке результатов на ЭВМ коэффициенты концентрации напряжений α_σ, α_τ для деталей, приведенных в табл. 1, вы-

числяются по формуле

$$\alpha_{\sigma,\tau} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{t/\rho} + B\frac{(1+a/\rho)^2}{(a/\rho)^3} + \frac{C}{(t/\rho)^2}\cdot\frac{a/\rho}{(a/\rho+t/\rho)}}}, \quad (1.19)$$

коэффициенты A, B, C и Z определяют по табл. 2 (a=d/2 или a=b/2), а в остальных случаях α_σ, α_τ определяют по формулам и номограммам, приведенным в ГОСТ 25.504-82.

Формула (1.19) является приближенной и дает отклонение 10-20 % в запас прочности.

Для вала диаметром d с поперечным отверстием диаметром определяют эффективный коэффициент концентрации напряжений по эмпирической формуле, в зависимости от предела прочности материала:

при изгибе $K_{\sigma_1} = 10^{b+c\sigma_u}$, при $0{,}05 \le \frac{a}{d} \le 0{,}15$, (1.20)

$K_{\sigma_2} = K_{\sigma_1} - 0{,}2$, при $0{,}15 \le \frac{a}{d} \le 0{,}25$, (1.21)

при кручении $K_\tau = m + e\sigma_u$, (1.22)

при растяжении, сжатии $K_{\sigma_3} = 1{,}45 + 5{,}5\cdot 10^{-4}\sigma_u$, (1.23)

где b=0,128, c=2,33·10^{-4}, m=1,17, e=8,3·10^{-4}.

Эффективный коэффициент концентрации для вала с пазом, выполненным торцевой фрезой определяют, согласно [9], как

$$K_\sigma = 1{,}01 + 1{,}25\cdot 10^{-3}\sigma_u, \quad (1.24)$$

$$K_\tau = 0{,}52 + 1{,}7\cdot 10^{-3}\sigma_u. \quad (1.25)$$

Для вала со шлицами, согласно [10], для

прямобочных $K_\sigma = 1{,}25 + 5\cdot 10^{-4}\sigma_u$, (1.26)

шлицев $K_\tau = 1{,}75 + 1\cdot 10^{-3}\sigma_u$, (1.27)

эвольвентных $K_\sigma = 1{,}25 + 5\cdot 10^{-4}\sigma_u$, (1.28)

шлицев $K_\tau = 1{,}28 + 3\cdot 10^{-4}\sigma_u$. (1.29)

Для вала с метрической резьбой по [9]

$$K_\sigma = 0{,}354 + 3{,}231 \cdot 10^{-3}\sigma_u - 9{,}43 \cdot 10^{-6}\sigma_u^2, \quad (1.30)$$

$$K_\tau = 0{,}52 + 1{,}7 \cdot 10^{-3}\sigma_u. \quad (1.31)$$

Значения предела прочности в приведенные выражения подставляются в МПа.

1.3.2.2. Влияние масштабного фактора на сопротивление усталости

С ростом диаметра гладких образцов их пределы выносливости снижаются, что является следствием влияния металлургического, технологического и статистического фактора. Наиболее существенное снижение пределов выносливости связано со статистическим характером возникновения микротрещин усталости, взаимосвязи его с неоднородностью напряженного состояния в пределах малых объемов, что требует соблюдения как геометрического, так и силового подобия для деталей разных размеров.

Влияние статистического масштабного фактора характеризуется коэффициентами

$$K_{d\sigma} = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}}, \qquad K_{d\tau} = \frac{\tau_{-1d}}{\tau_{-1}}, \quad (1.32)$$

где σ_{-1d}, τ_{-1d} - пределы выносливости при изгибе и кручении гладких образцов диаметром d; σ_{-1}, τ_{-1} - то же для гладких лабораторных образцов диаметром d_0 = 7,5 мм.

При определении K_σ и K_τ по формулам (1.16) и (1.17) в ГОСТ 25. 504-82 рекомендуется принимать

$$K_{d\sigma} = K_{d\tau} = K_2, \qquad \text{где}$$

$$K_2 = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_{-1}^p}{\sigma_{-1}}\right) \cdot 0{,}77 \lg \frac{d}{d_0}, \quad \text{для } d \leq 150 \text{ мм}, \quad (1.33)$$

$$K_2 = \frac{\sigma_{-1}^p}{\sigma_{-1}}, \qquad \text{для } d > 150 \text{ мм},$$

где σ_{-1}^p - предел выносливости при растяжении-сжатии.

Таблица 2

Значения коэффициентов для вычисления $a_{б,г}$

Коэффициенты	Форма образца детали	Двусторонний надрез (выточка)			Ступенчатый переход по галтели		
		изгиб	растяжение	кручение	изгиб	растяжение	кручение
A	круглый	0,2	0,22	0,7	0,62	0,62	3,4
	плоский	0,2	0,22	-	0,50	0,5	-
B	круглый	2,75	1,37	10,3	5,8	3,5	-
	плоский	2,1	0,85	-	6,0	2,5	-
C	круглый	-	-	-	0,2	-	1,0
Z		-	-	-	3,0	-	2,0

При отсутствии экспериментальных данных отношение $б_{-1}^{р}/б_{-1}$ для гладких лабораторных образцов принимают равным 0,8.

1.3.2.3. В расчетных выкладках [11] роль концентрации напряжений и масштабного эффекта описывается единым отношением $K_б/K_{об}$; таким образом, разделение факторов носит условный характер. Поэтому естественной является попытка связать масштабный эффект и концентрацию напряжений в единый комплекс не только по форме, но и по существу, связанному со статистическим характером возникновения и накопления структурных повреждений. Рассмотрим некоторые положения, вытекающие из статистической теории подобия усталостного разрушения.

Было замечено, что градиент напряжений $\vec{G}$ в концентраторе напряжений - тоже своего рода масштабный эффект. Если местные

напряжения убывают медленно, то тогда в относительно широкой зоне местных напряжений оказывается большее число кристаллитов и в статистическом аспекте опасность возникновения трещины возрастает. Увеличение относительного градиента $\bar{G}$ снижает чувствительность материала к местным напряжениям.

Обратное влияние оказывает линейная протяженность L очага концентрации. Чем больше величина L, тем больше число кристаллитов находится в зоне повышенных напряжений и возрастает вероятность образования усталостной трещины. На рис. 7 показана линейная протяженность L части периметра рабочего сечения детали, прилегающая к местам повышенной концентрации напряжений для различных концентраторов.

Таким образом, площадь поперечного сечения, охваченная зоной повышенных напряжений, характеризуется величиной $L/\bar{G}$ (мм²). В результате для сталей, алюминиевых и магниевых сплавов, чугуна с шаровидным графитом, титановых сплавов имеем

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_\sigma}{1+\theta^{-\gamma_\sigma}}, \qquad \frac{K_\tau}{K_{d\tau}} = \frac{2\alpha_\tau}{1+\theta^{-\gamma_\tau}}, \tag{1.34}$$

где $\alpha_\sigma, \alpha_\tau$ - теоретические коэффициенты концентрации напряжений, θ - относительный критерий подобия.

Относительный критерий подобия вычисляется по формуле

$$\theta = \frac{1}{88,3} \cdot \frac{L}{\bar{G}}, \tag{1.35}$$

где $1/\bar{G}$ и L следует подставить в мм, а γ_σ и γ_τ - постоянные уравнения подобия.

Для углеродистых сталей γ_σ = 0,1-0,14, для алюминиевых сплавов γ_σ = 0,08-0,09, для чугуна с шаровидным графитом γ_σ= =0,15. Для легированных сталей значение γ_σ меняется, в основном, в пределах 0,04-0,08. Если прямые опытные данные величин γ_σ, γ_τ отсутсвуют, они могут быть определены приближенно: $\gamma_\sigma = 0,2\cdot10^{-4}\,\sigma_u$, $\gamma_\tau = 1,5\,\sigma_u$; σ_u- предел прочности, МПа.

1.3.2.4. Влияние коррозии трения (фреттинг-коррозии) на сопротивление усталости

В местах напрессовки деталей на валы или оси у края сту-

Эскизы образцов к определению параметра L

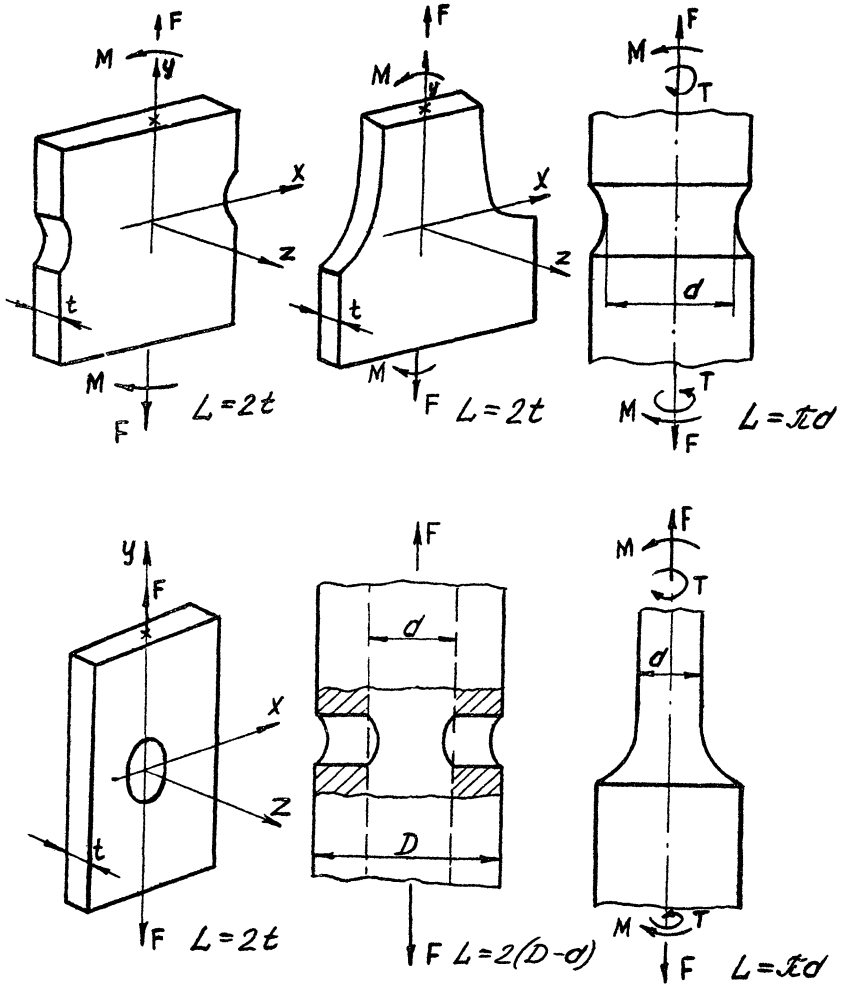


Рис. 7

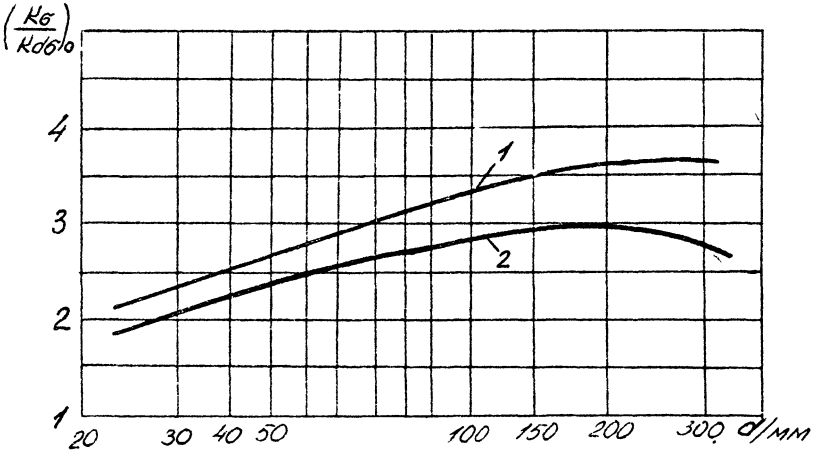
пицы возникает концентрация напряжений и коррозия трения, снижающие предел выносливости.

Для стальных валов и осей с напрессованными деталями

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}\right)_0 \xi' \xi'', \qquad (1.36)$$

где значение отношений ($K_\sigma / K_{d\sigma}$) принимается из графика 8.

Зависимость коэффициента $K_\sigma / K_{d\sigma}$ от диаметра вала с напрессованными деталями при изгибе



1 - через напрессованную деталь передается сила или момент; 2- через напрессованную деталь не передается усилий.

Рис. 8

ξ' и ξ'' - коэффициенты, учитывающие влияние предела прочности (МПа) и давления посадки F (МПа).

$$\xi' = 305 + 0{,}00139\,\sigma_u; \qquad (1.37)$$

$$\xi'' = 0{,}65 + 0{,}014\,F, \text{при } F \leq 25 \text{ МПа};$$

$$\xi'' = 1, \text{ при } F > 25 \text{ МПа}.$$

1.3.2.5. Влияние качества обработки поверхности

Неровности, получающиеся после механической обработки поверхности являются источниками концентрации напряжений, существенно снижающей сопротивление усталости. Снижение предела выносливости оценивают коэффициентами влияния качества обработки поверхности на величину пределов выносливости $K_{F\sigma}$, $K_{F\tau}$ при изгибе и кручении соответственно. Указанные коэффициенты зависят от предела прочности стали и показателя шероховатости.

$$K_{F\sigma} = \frac{\sigma_{-1}(R_z)}{\sigma_{-1}(R_z \leq 1)} = 1 - 0{,}22 \lg R_z \left(\lg \frac{\sigma_u}{20} - 1\right), \; R_z > 1 \text{ мкм} \quad (1.38)$$

$K_{F\sigma} = 1$ при $R \leq 1$ мкм,

где $\sigma_{-1}(R_z)$ - предел выносливости гладкого образца с шероховатостью R_z, $\sigma_{-1}(R_z \leq 1)$ - предел выносливости полированного образца.

$$K_{F\tau} = 0{,}575 K_{F\sigma} + 0{,}425. \quad (1.39)$$

Таблица 3

Значение коэффициента $K_{F\sigma}$ для алюминиевых деформированных сплавов

Окончательная обработка	Параметры шероховатости R_z, мкм	$K_{F\sigma}$
Полирование	0,5 - 1	1,0
Шлифование	1,5 - 2	0,96 - 0,98
Чистовое точение	4 - 10	0,87 - 0,94
Точение	10 - 15	0,84 - 0,83
Грубое точение	20 - 30	0,78 - 0,83
Весьма грубое точение	50 - 100	0,70 - 0,75

1.3.2.6. Влияние методов поверхностного упрочнения на сопротивление усталости

Применение методов поверхностного упрочнения приводит в ряде случаев к существенному повышению пределов выносливости

(в 2-3 раза и более), вследствие чего является мощным средством повышения надежности и долговечности машин при одновременном снижении их массы. Так, при таких сложных условиях работы материала как коррозионная усталость, методами поверхностной закалки и поверхностно-пластического деформирования можно повысить предел выносливости в 2-3 раза.

Повышение пределов выносливости вследствие поверхностного упрочнения характеризуется коэффициентом

$$K_{\gamma} = \sigma_{-1д\,упр} / \sigma_{-1д}\,, \qquad (1.40)$$

где $\sigma_{-1д\,упр}$, $\sigma_{-1д}$ - пределы выносливости упрочненной и неупрочненной детали соответственно. Осредненные значения K_{γ} для некоторых видов обработки в зависимости от диаметра образца и наличия концентрации напряжений приведены в табл. 4. С ростом уровня концентрации напряжений эффект упрочнения, характеризуемый коэффициентом K_{γ}, возрастает, с увеличением размеров деталей - уменьшается. Причинами существенного положительного влияния методов поверхностного упрочнения являются остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое и повышенная прочность материала слоя, возникающие при поверхностной обработке. С ростом асимметрии цикла эффект упрочнения снижается. Так, при переходе от симметричного цикла к нулевому коэффициент упрочнения при цементации снижается на 25%.

1.3.2.7. Определение коэффициента анизотропии K_{A}.

Коэффициент анизотропии учитывают, если первое главное напряжение при изгибе и растяжении- сжатии направлено перпендикулярно прокатке материала.

При кручении анизотропию не учитывают. Значения коэффициента анизотропии K_{A} определяют по табл. 5.

1.3.3. Расчеты на выносливость по коэффициентам запаса прочности при переменном нагружении

Предельная амплитуда напряжений σ_{a}' для лабораторных образцов при асимметричном нагружении может быть выражена уравнением, достаточно хорошо соответствующим эксперементальным данным в диапозоне $-1 < R_{\sigma} < 0,5$:

Таблица 4

Значение коэффициента K_{γ} в зависимости от вида обработки и диаметра образца

Тип обработки	Тип образца	Диаметр в мм	K_{γ}
Закалка токами высокой частоты	Без концентрации	7 - 20 30 - 40	1,3 - 1,6 1,2 - 1,5
	С концентрацией	7 - 20 30 - 40	1,6 - 2,8 1,5 - 2,5
Азотирование на глубину 0,1 - 0,4	Без концентрации	8 - 15 30 - 40	1,15 - 1,25 1,10 - 1,15
	С концентрацией	8 - 15 30 - 40	1,9 - 3,0 1,3 - 2,0
Цементация на глубину 0,2 - 0,6 мм	Без концентрации	8 - 15 30 - 40	1,2 - 2,1 1,1 - 1,5
	С концентрацией	8 - 15 30 - 40	1,5 - 2,5 1,2 - 2,0
Обработка роликами	Без концентрации	7 - 20 30 - 40	1,2 - 1,4 1,1 - 1,25
	С концентрацией	7 - 20 30 - 40	1,5 - 2,2 1,3 - 1,8
Обдув дробью	Без концентрации	7 - 20 30 - 40	1,1 - 1,3 1,1 - 1,2
	С концентрацией	7 - 20 30 - 40	1,4 - 2,5 1,1 - 1,5

Таблица 5

Значения коэффициентов анизотропии K_A.

σ_u, МПа	K_A
До 600	0,9
Св. 600 до 900	0,86
-"- 900 -"- 1200	0,83
-"- 1200	0,80

$$\sigma_a' = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m' , \qquad (1.41)$$

где σ_m'-текущее значение среднего напряжения цикла; ψ_σ-коэффициент влияния асимметрии цикла на предельную амплитуду определяется как (1.6).

Для сталей можно принять

$$\psi_\sigma = 0{,}02 + 2\cdot 10^{-4} \sigma_u , \qquad (1.42)$$

где σ_u-предел прочности, МПа.

При кручении принимают $\psi_\tau = 0{,}5\psi_\sigma$. Для легких деформируемых сплавов коэффициент ψ_σ уменьшается с ростом предела прочности

$$\psi_\sigma = 0{,}48 - 0{,}00055\,\sigma_u . \qquad (1.43)$$

Для поверхностно-упрочненных деталей коэффициент ψ_σ выше, чем для неупрочненных. Например, для цементованных образцов ψ_σ = =0,5 - 0,6. Многочисленные испытания при асимметричных циклах показывают, что предельная амплитуда σ_{ag}' образца с концентрацией напряжений или детали может быть определена по формуле

$$\sigma_{ag}' = \frac{\sigma_a'}{K} = \frac{\sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_{mg}'}{K} = \sigma_{-1g} - \psi_{\sigma g} \sigma_{mg}' , \qquad (1.44)$$

где $$\sigma_{-1g} = \frac{\sigma_{-1}}{K} , \quad \psi_{\sigma g} = \frac{\psi_\sigma}{K} , \qquad (1.45)$$

σ_{mg}' -среднее напряжение цикла в детали; К-суммарный коэффициент, учитывающий влияние всех факторов на сопротивление усталости (1.11).

При оценке коэффициента запаса прочности n_σ предполагают, что вследствие случайных причин уровень напряжений может возрасти, но так, что все компоненты напряжений цикла σ_a, σ_m, σ_{max} возрастают пропорционально друг другу (при этом сохраняется коэффициент асимметрии цикла).

Под коэффициентами запаса прочности понимают отношение предельных напряжений к рабочим

$$n_\sigma = \sigma'_{ag} / \sigma_a = \sigma'_{mg} / \sigma_m = \sigma'_{maxg} / \sigma_{max}, \qquad (1.46)$$

где σ'_{ag}, σ'_{mg}, σ'_{maxg} - предельные значения амплитуды, среднего и максимального напряжений цикла для детали. Учитывая, что $\sigma'_{ag} = n_\sigma \sigma_a$, получим

$$n_\sigma \sigma_a = \frac{\sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m n_\sigma}{K},$$

отсюда

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{K \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}. \qquad (1.47)$$

При расчете на кручении

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{K \tau_a + \psi_\tau \tau_m}. \qquad (1.48)$$

При одновременном возникновении нормальных σ и касательных τ напряжений имеем коэффициент запаса прочности

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}}. \qquad (1.49)$$

Деталь считается работоспособной, если $n \geq [n]$.

Назначение $[n]$ может зависеть от следующих факторов:

1. от достоверной точности определения усилий и напряжений;
2. от однородности материала;
3. от культуры и технологии изготовления детали.

В зависимости от вышеперечисленных факторов можно выделить три группы значений допускаемого коэффициента запаса прочности при расчетах на выносливость.

1. Группа - $[n] = 1,3 - 1,5$ назначается при повышенной точности расчета с использованием экспериментальных данных определения усилий для деталей, изготовленных из однородного материала при качественной технологии и высокой культуре производства (например, коленчатые валы);

2. группа $[n] = 1,5 - 2$ назначается при недостаточно полном объеме экспериментальной информации о нагрузках и прочности детали, при среднем уровне культуры производства, но в условиях систематического дефектоскопического контроля;

3. группа $-[n] = 2 - 3$ назначается при малом объеме или отсутствии экспериментальной информации, высоком уровне производства.

1.3.4. Определение пределов выносливости деталей машин и элементов конструкций для заданной вероятности разрушения $(\sigma_{-1g})_P$

При наличии достаточного объема статистической информации для оценки коэффициента вариации пределов выносливости деталей машин ($\nu_{\sigma_{-1д}}$ или $\nu_{\tau_{-1д}}$), используя вычисленное для заданной базы по формулам 1,8 - 1,12 медианное значение предела выносливости ($\bar{\sigma}_{-1д}$ или $\bar{\tau}_{-1д}$), определяют пределы выносливости детали на той же базе для любых заданных вероятностей разрушения P в предположении справедливости нормального закона распределения по формулам

$$(\sigma_{-1д})_P = \bar{\sigma}_{-1д}(1 + Z_P \nu_{\sigma_{-1д}}) \; ; \qquad (1.50)$$

$$(\tau_{-1д})_P = \bar{\tau}_{-1д}(1 + Z_P \nu_{\tau_{-1д}}) \; , \qquad (1.51)$$

где Z -квантиль нормального распределения, соответствующая заданной вероятности вероятности разрушения P.

1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1. В чем проявляется особенность действия переменных нагрузок на прочность деталей машин и элементов конструкций?

2. Какой характер разрушения материала при переменных нагрузках?

3. Назовите характеристики цикла ($\sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_m, \sigma_a$).

4. Какой цикл нагружения называют симметричным, асимметричным?

5. Как определяется коэффициент асимметрии цикла?

6. Как строится кривая усталости?

7. Дайте определение предела выносливости. Укажите связь механических характеристик прочности и предела выносливости

материала.

8. Как оценивается предел выносливости натурной детали?

9. Какие факторы влияют на предел выносливости?

10. Как определяется теоретический, эффективный коэффициент концентрации?

11. Дайте определение градиента напряжений относительного градиента напряжений?

12. Как определяется критерий подобия в статистической теории подобия усталостного разрушения?

13. Какие методы и как способствуют увеличению предела выносливости материала?

14. В чем сущность расчета на выносливость деталей по коэффициентам запаса прочности?

15. Как выбирается значение нормативного коэффициента запаса прочности?

16. Как проводится определение пределов выносливости деталей машин и элементов конструкций для заданной вероятности разрушения?

1.5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

Расчеты деталей машин на выносливость обычно проводятся в качестве проверочных и осуществляются после проведенного проектировочного расчета на статическую прочность и конструктивного оформления детали и конструкции в целом. При проведении расчета на выносливость выявляются опасные сечения в детали и конструкции, связанные с концентраторами напряжений. Причем эти опасные сечения при расчете на выносливость могут не совпадать с опасными сечениями при расчете на статическую прочность. В этих сечениях в качестве критерия напряженности подсчитывают величину условных суммарных амплитудных напряжений (МПа) с учетом их концентрации

$$\sigma_{a\,сум} = K_\sigma \left(10\sqrt[3]{M_a^2 + T_a^2}/W_{ос}\right), \qquad (1.52)$$

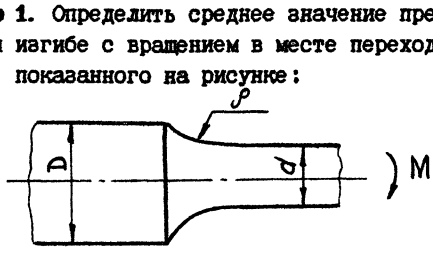
где K_σ - эффективный коэффициент концентрации напряжений; M_a - наибольший амплитудный суммарный изгибающий момент, Н·м, в расчитываемом сечении; крутящий момент - T_a, Н·м, который

для нереверсивных валов равен половине расчетного крутящего момента, для реверсивных - расчетному моменту.

Сечения, в которых $\sigma_{a\,сум}$ имеет наибольшую величину или отличается от наибольшей не более чем на 30%, являются опасными и подлежат дальнейшему расчету на выносливость.

1.6. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО РАСЧЕТУ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

Пример 1. Определить среднее значение предела выносливости вала при изгибе с вращением в месте перехода одного сечения по галтели, показанного на рисунке:



Дано: D=120 мм; d=100 мм; ρ=10 мм. Вал изготовлен из стали 45, σ_u=650 МПа, $\bar{\sigma}_1'$=300 Мпа, поверхностному упрочнению вал не подвергался. Вал изготовлен тонкой обточкой (R_z=6,3мкм).

1. Находим значение α_σ по черт. 27, приложения 3, ГОСТ 25.504--82. Тоже самое можем вычислить по формуле (1.19).

Для $\bar{D}/\bar{d}$ =120/100=1,2 и $\bar{\rho}/\bar{d}$ =10/100=0,1 $\bar{\alpha}_\sigma$ =1,62.

2. Определяем $\bar{G}$ по формуле табл. 1

$t = \frac{\bar{D}-\bar{d}}{2}$=10мм; $\frac{t}{\rho}$=10/10=1; $\varphi = \frac{1}{4\sqrt{t/\rho}+2} = \frac{1}{4,1+2}$=0,167;

$\bar{G} = \frac{2,3(1+\varphi)}{\rho} + \frac{2}{d} = \frac{2,3(1+0,167)}{10} + 2/100 = 0,268+0,02 = 0,288$ 1/мм.

3. Вычисляем относительный критерий подобия θ .

$L = \pi d$ =314 мм - при изгибе с вращением круглого вала;

$L/\bar{G} = \frac{314}{0,288}$=1090 мм^2 ; $\theta = L/\bar{G} \cdot \frac{1}{88,3} = \frac{1090}{88,3}$=12,35.

4. Для стали 45 можно принять ψ_σ =0,2-10$^{-4}\sigma_u$= 0,2-10^{-4}·650=0,135.

Тогда по формуле (1.34) получаем

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_\sigma}{1+\theta^{-\psi_\sigma}} = \frac{2\cdot 1,62}{1+12,35^{-0,135}} = 1,9.$$

5. Для случая тонкой обточки (R_z=6,3 мкм)

$K_{F\sigma}$=1-0,22 lg R_z(lg$\frac{\sigma_u}{20}$-1)=1-0,22·lg6,3 (lg$\frac{650}{20}$-1)=0,91.

6. Определяем значение К по формуле (1.11)

$$K=\left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}+\frac{1}{K_{F\sigma}}-1\right)\frac{1}{K_v K_A}$$

коэффициент анизотропии $K_A=1$; $K_v=1$, тогда

$K=(1,9+1/0,91-1)\cdot 1=2,0$

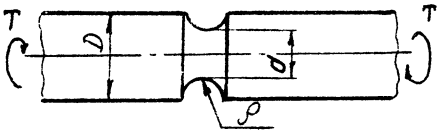
7. Среднее значение предела выносливости металла заготовки вычисляем по формуле (1.9):

$\bar{\sigma}_{-1}=K_A\sigma'_{-1}=1\cdot 300=300$ МПа.

8. Среднее значение предела выносливости вала составит

$$\bar{\sigma}_{-1A}=\frac{\bar{\sigma}_{-1}}{K}=300/2=150 \text{ МПа}.$$

Пример 2. Определить среднее значение предела выносливости вала с канавкой при кручении



Дано: D=200 мм; d=180 мм; $\rho=1,8^{\pm 0,3}$ мм. Вал изготовлен из стали марки 40 ХН; $\sigma_u=820$ МПа; $\sigma_y=650$ МПа; $\sigma'_{-1}=240$ МПа; канавка изготовляется тонкой обточкой и поверхностному упрочнению не подвергается (R_z=6,3 мкм).

1. Находим значение α_τ по формуле (1.19)

$$\alpha_\tau=2,6.$$

2. Определяем значение q по рис. 6 при $\frac{\sigma_y}{\sigma_u}=\frac{650}{820}=0,79$

$$q=0,96.$$

3. Величину K_τ определяем по формуле (1.15)

$K_\tau=1+q(\alpha_\tau-1)=1+0,96(2,6-1)=2,54.$

4. Для d = 180 мм принимаем K_2=0,8.

5. Отношение $K_\tau/K_{F\tau}$, определяем как

$$\frac{K_\tau}{K_{d\tau}}=\frac{K_\tau}{K_2}=\frac{2,54}{0,8}=3,18.$$

6. Определяем $K_{F\sigma}$ и $K_{F\tau}$ для тонкой обточки (R_z=6,3 мкм)

$K_{F\sigma}=1-0,22\lg Rz(\lg\frac{\sigma_u}{20}-1)=1-0,22\lg 6,3(\lg\frac{820}{20}-1)=0,89;$

$K_{F\tau}=0,575\ K_{F\sigma}+0,425=0,575\cdot 0,89+0,425=0,94.$

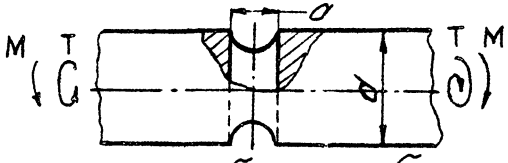
7. При отсутствии поверхностного упрочнения
$K_u=1$.
8. При кручении $K_A=1$;

$$K=\left(\frac{K_\tau}{K_{d\tau}}+\frac{1}{K_{F\tau}}-1\right)\frac{1}{K_A\cdot K_U}=\left(3,18+\frac{1}{0,94}-1\right)\frac{1}{1\cdot 1}=3,24.$$

9. Принимаем коэффициент K_1 для d=180 мм, согласно формулы (1.10)
$K_1=0,74$.
10. Вычисляем предел выносливости материаала заготовки по формуле (1.9)
$\tau_{-1}=K_1\bar{\sigma}'_{-1}=0,74\cdot 240=178$ МПа.
11. Вычислим средний предел выносливости вала по формуле (1.3)

$$\tau_{-1A}=\frac{\bar{\tau}_{-1}}{K}=\frac{178}{3.24}=54,9\text{МПа}.$$

Пример 3. Определить коэффициент запаса прочности для вала с поперечным отверстием при изгибе с вращением и кручением.



Дано: d=50 мм; a=5мм; σ_u=610 МПа; σ_y=360 МПа. Материал: сталь 45 нормализованная: R_z=12,7 мкм. В исследуемом сечении M=202 Н·м, T=150 Н·м.

1. Предел выносливости для стали
$\bar{\sigma}'_{-1}=0,5\sigma_u=305$ МПа, $\bar{\tau}'_{-1}=0,6\bar{\sigma}_{-1}=0,6\cdot 305=183$ МПа.
2. Нормальные напряжения для исследуемого сечения

$$\sigma_a=\frac{M}{W_{oc}}=\frac{M}{\frac{\pi d}{32}-\frac{ad^3}{6}}=\frac{202\cdot 10^3}{10182}=19,8\text{ МПа}.$$

3. Касательные напряжения отнулевого цикла для сечения

$$\tau_a=\tau_m=\frac{\tau_{max}}{2}=\frac{T}{2W_{oc}}=\frac{T}{\frac{\pi d^3}{16}-\frac{ad^3}{6}}=\frac{150\cdot 10^3}{22448}=6,6\text{ МПа}.$$

4. Эффективные коэффициенты концентрации напряжений для стали

45 с σ_u =610 МПа при a/d=0,1 принимаем по ГОСТ 25.504-82 граф. 4 и 5

K_σ=1,95; K_τ=1,75.

5. Масштабные коэффициенты $K_{d\sigma}=K_{d\tau}=K_2$ определяем по формуле 1.33

$$K_2=1-(1-\frac{\sigma_{-1}^{P}}{\sigma_{-1}})0,77\ \lg\frac{d}{d_0}=1-(1-0,8)\lg\frac{50}{7,5}=0,873.$$

6. Отношение $K_\sigma/K_{d\sigma}$ и $K_\tau/K_{d\tau}$ определяем

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}=\frac{K_\sigma}{K_2}=\frac{1,95}{0,87}=2,23;\quad \frac{K_\tau}{K_{d\tau}}=\frac{K_\tau}{K_2}=\frac{1,75}{0,873}=2,0.$$

7. Определяем $K_{F\sigma}, K_{F\tau}$ для точения (R_z=12,7 мкм), формулы (1.38), (1.39).

$$K_{F\sigma}=1-0,22\ \lg Rz(\lg\frac{\sigma_u}{20}-1)=1-0,22\ \lg 12,7(\lg\frac{610}{20}-1)=0,88;$$

$$K_{F\tau}=0,573\ K_{F\sigma}+0,425=0,575\cdot 0,88+0,425=0,93.$$

8. При отсутствии поверхностного упрочнения K_ψ=1, K_y=1.

9. Определяем коэффициенты K' и K".

$$K'=(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}+\frac{1}{K_{F\sigma}}-1)\frac{1}{K_A K_\psi}=(2,23+\frac{1}{0,88}-1)\frac{1}{1,1}=2,37;$$

$$K''=(\frac{K_\tau}{K_{d\tau}}+\frac{1}{K_{F\tau}}-1)\frac{1}{K_A K_\psi}=(2+\frac{1}{0,93}-1)\frac{1}{1,1}=2,075.$$

10. Для углеродистых сталей K_1=1.

11. Вычисляем средний предел выносливости материала заготовки по формуле (1.9)

$\bar{\sigma}_{-1}=K_1\sigma'_{-1}=1\cdot 305=305$ МПа;

$\bar{\tau}_{-1}=K_1\tau'_{-1}=1\cdot 183=183$ МПа.

12. Коэффициенты, учитывающие влияние постоянной составляющей цикла по формулам (1.42) и (1.43):

$\psi_\sigma=0,02+2\cdot 10^{-4}\sigma_u=0,02+2\cdot 10^{-4}\cdot 610=0,142.$

$\psi_\tau=0,5\psi_\sigma=0,5\cdot 0,142=0,071.$

13. Определяем коэффициенты запаса прочности по нормальным и касательным напряжениям

$$n_\sigma=\frac{\bar{\sigma}_{-1}}{K'\sigma_a+\psi_\sigma\sigma_m}=\frac{305}{2,37\cdot 19,8+0,142\cdot 0}=6,5;$$

$$n_\tau=\frac{\bar{\tau}_{-1}}{K''\tau_a+\psi_\tau\tau_m}=\frac{183}{2,075\cdot 6,6+0,071\cdot 6,6}=12,9.$$

14. Общий коэффициент запаса прочности

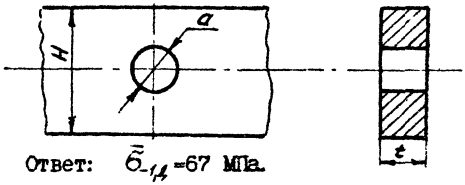
$$n_{\Sigma} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{6,5 \cdot 12,9}{\sqrt{6,5^2 + 12,9^2}} = 5,8.$$

Принимая $[n] = 2,5$, получаем $5,8 > 2,5$ - прочность на выносливость обеспечена.

1.7. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 1.

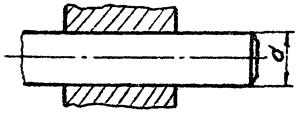
Определить среднее значение предела выносливости пластины с отверстием при растяжении-сжатии. Пластина изготовлена из стали марки Ст. 3, σ_u =402 МПа, σ_{-1}'=18 МПа, σ_y =270 МПа, R_z=50 мкм, H=100 мм, a=$10^{+0.1}$ мм, t=12 мм.



Ответ: $\sigma_{-1,4}$=67 МПа.

Задача 2.

На стальной вал d=50 мм напрессован шкив с усилием F=30 МПа, передающий при работе ременной передачи усилие и изгибающий момент на вал. Определить среднее значение предела выносливости вала при изгибе с вращением. Вал изготовлен из стали 45 σ_u=650 МПа, σ_{-1}'=300 МПа. Поверхность вала обточена (R_z=6,3 мкм). Напрессовка осуществлялась горячим методом.

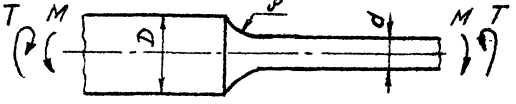


Ответ: σ_{-1}=80,6 МПа.

Задача 3.

Стальной ступенчатый вал диаметрами D=40 мм, d=20 мм и радиусом галтели ρ=10 мм испытывает переменный изгиб с круче-

нием: нормальные напряжения изменяются от σ_{max}=40 МПа до σ_{min} = =-40 МПа; касательные - от τ_{max}=30 МПа до τ_{min} =10 МПа. Вал подвергнут тонкой обточке; характеристики материала: сталь 40х $\bar{\sigma}_u$ =1000 МПа; $\bar{\sigma}_{-1}$ =450 МПа. Определить запас прочности вала.



1.8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Методы расчета на прочность деталей машин, основанные на сравнении действующих напряжений с допустимыми или на вычислении коэффициетов запаса прочности, широко используются в машиностроении для ряда деталей. Однако этим методам свойственны некоторые недостатки, для устранения которых разрабатываются новые подходы к расчету на прочность. Главными недостатками этих методов является то, что не учитывается случайный характер изменения нагрузок и рассеяния характеристик прочности, а также то, что не проводится оценка этими методами надежности конструкций в зависимости от усталостной долговечности. Новые методики расчета конструкций на выносливость в вероятном аспекте изложены в пункте 1.3.4 настоящего пособия, а также в специальной литературе [12] и частично в ГОСТ 25.504-82.

Во многих реальных конструкциях наблюдается разрушение после относительно небольшого числа циклов нагружения, исчисляемого несколькими тысячами повторений. Разрушение после малого числа циклов нагружения от так называемой малоцикловой усталости обычно происходит при значительной (около 1%) пластической циклической деформации в микрообъемах рассматриваемого элемента конструкции. Расчеты элементов конструкций на малоцикловую усталость базируются на эксперементальных данных изучения закономерностей сопротивления деформированию и разрушению при циклическом упруго-пластическом деформировании изложены в [1, с.618-625].

Во многих деталях машин уже в процессе изготовления проявляются дефекты, которые можно рассматривать как некоторые

эквивалентные трещины по их влиянию на конструкционную прочность. Так, в сварных деталях к таким дефектам могут быть отнесены непровары, горячие и холодные трещины; возможно появление дефектов при нарушениях технологии термической обработки, шлифования и т. д. При наличии резкой концентрации напряжений и дефектов могут возникнуть усталостные трещины; возможно появление дефектов при нарушениях технологии термической обработки, шлифования и т. д. При наличии резкой концентрации напряжений и дефектов могут возникнуть усталостные трещины на ранних стадиях эксплуатации. Поэтому большое значение имеет проблема оценки долговечности (живучести) детали в условиях эксплуатации на стадии развития трещины, т. е. от момента появления первой макроскопической трещины длиной 0,2 - 0,5 мм до окончательного разрушения. Проблема живучести очень важна, так как именно она определяет ресурс деталей с дефектами. Развитие экспериментальных методов оценки трещиностойкости - выявление усталостных трещин позволяют разработать критерии выбора материалов и конструктивно-технологических вариантов, обеспечивающих наибольшую надежность и долговечность при наименьшей металлоемкости.

Оценка живучести деталей машин и элементов конструкций как новый раздел сопротивления материалов, называемый линейной и нелинейной механикой разрушения, излагается пока, в основном, в специальной литературе, например, [13, с. 186-210].

1.9. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСИСТЕМЫ (Ustmet) В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Автоматизированная подсистема может быть использована при изучении раздела "Усталость металлов" курса сопротивления материалов для студентов механических специальностей и слушателей факультета переподготовки при изучении вопросов прочности и надежности конструкций при переменных нагрузках. Можно предложить на основании АС выполнение учебно-исследовательских работ по следующим тематикам:

1. Влияние геометрических параметров концентратора напряжений на прочность детали при переменной нагруженности.

2. Влияние механических свойств материала на прочность детали при переменном нагружении.

3. Влияние упрочняющих технологий на прочность детали при переменном нагружении.

4. Оценка прочности детали (конструкции) при различных видах переменного нагружения.

5. Влияние параметров переменного нагружения на прочность конструкции (по коэффициенту запаса прочности).

6. Проверка прочности заданного элемента конструкции при переменном нагружении.

Желательно перед выходом на ЭВМ один вариант учебно-исследовательского задания просчитать по безмашинному варианту с использованием методического пособия. В процессе расчета различных вариантов необходимо получить на АЦПУ твердые копии исходных данных и результатов расчета, на основании которых можно построить соответствующие графики для обоснования выводов работы.

1.9.1. Подготовка исходных данных

Для определения характеристик выносливости данной детали необходимо подготовить следующие исходные данные:

1. Геометрические параметры заданного концентратора напряжений в мм.

2. Механические свойства конструкционного материала заданной детали, как: предел прочности σ_u; предел текучести σ_y; предел выносливости σ_{-1} в МПа.

Если значение предела выносливости материала неизвестно, то система может вычислить по приближенной формуле, если класс материала имеется в меню системы. Другой путь - использование пояснения FRAS, где имеется перечень механических свойств ряда конструкционных материалов.

3. Значение шероховатости концентратора R_z или R_a в мкм. Если имеются сведения только по шероховатости R_a, то используя пояснение FRAS надо пересчитать его в значение шероховатости R_z. В пояснении можно также выбрать значение шероховатости для часто встречаемых концентраторов напряжений.

4. Для определения коэффициента запаса прочности конструкции или детали необходимо знать величины амплитуд σ_σ, τ_σ и средних σ_m, τ_m напряжений, возникающих в исследуемом сечении под действием переменных нагрузок.

1.9.2. Руководство пользователя по работе с программой Ustmet

1. Запуск программы.

Запуск команды производится из командной строки дисковой операционной системы DOS, например:

C: ustmet ustmet

(большими буквами выделено приглашение операционной системы).

После запуска программа выводит главное диалоговое окно. В верхней строке экрана расположено главное меню, включающее следующие пункты:

(About) - получение краткой информации о разработчиках программы;

(Расчет) - переход к расчету.

Для перехода из главного диалогового окна к меню необходимо нажать клавишу (F 10), находясь в меню клавишами-стрелками выбрать необходимый режим, и подтвердить ввод нажатием клавиши (ENTER).

2. Режим (About).

В этом режиме на экране показывается краткая информация о разработчиках программы. Для возврата из режима в главное диалоговое окно, необходимо нажать клавишу (ESC). (Эту клавишу следует применять и в дальнейшем для возврата в режим, непосредстенно предшествующий текущему).

3. Режим (Расчет).

После выбора в меню этого режима на экране будет представлено диалоговое окно, предназначенное для ввода исходных данных расчета. Для перемещения по полям ввода применяются клавиши:

(TAB) - перемещение вперед;

(SHIFT) - (TAB) - перемещение назад.

При нахождении в поле ввода с надписью "Нажмите (ENTER)", необходимо нажать эту клавишу. Программа предоставит выбор ка-

кой - либо величины из списка. Для перемещения по списку используются клавиши - стрелки, для подтверждения выбора - (ENTER). При нахождении в полях ввода без надписи "Нажмите (ENTER)", необходимо, пользуясь алфавитно-цифровыми клавишами, ввести число (предел прочности, шероховатость и т.д.) или строку (фамилия, группа). В любом поле ввода можно получить конкретную помощь при нажатии клавиши (F 1).

После того, как все данные сведены, необходимо нажать клавишу (F 1) для начала расчета. После нажатия этой клавиши, программа выведет результаты расчета или сообщение об ошибке. В последнем случае, производится возврат в окно ввода и предоставляется возможность исправления ошибки.

После получения результатов расчета, их можно получить на бумаге, или в дисковом файле, нажимая клавиши (F 1) - (F 4) по указанию программы. Из окна с результатами расчета можно вернуться в окно ввода, и произвести исправление введенных значений, если полученные результаты чем-либо не устраивают.

4. Завершение работы программы; необходимо вернуться в главное диалоговое окно программы и нажать комбинацию клавиш (ALT) - (X). Произойдет возврат в операционную систему DOS.

1.10. З А Д А Н И Я

на выполнение расчетно-проектировочной работы "Расчет на прочность при переменном нагружении"

Определить предел выносливости и коэффициент запаса прочности участка детали с заданным концентратором напряжений (см. приложение 6), с учетом его геометрических параметров, механических свойств материала, вида нагружения.

Таблица 6

Вариант	Вид концентратора	Геометрические параметры концентратора (мм)			Марка материала	Механические свойства в МПа			Шероховатость R_z (мкм)	Вид упрочнения	Вид переменного нагружения
		D 2	D 1	R		$\sigma_{и}$	$\sigma_{ч}$	σ_{-1}			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	100	80	10	Сталь 45	650	450	300	0,3	нет	изгиб
2	1	50	40	5	Сталь 40	580	340	240	12,5	ТВЧ	кручение
3	1	40	35	2	Сталь 40Х	730	500	320	20	ТВЧ	изгиб
4	1	35	30	0,5	Сталь 20Х	650	400	300	20	азотир.	изгиб с кручением

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	1	28	24	0,8	Сталь 30ХГТ	1150	950	520	12,5	ТВЧ	кручение
6	1	30	24	1,5	Сталь 40ХН	820	650	360	20	нет	изгиб с кручением
7	11	35	28	3	Сталь 45	650	450	300	40	обд. пр.	изгиб
8	11	100	60	10	Сплав АМГ6	248	139	69	20	нет	растяжение
9	11	80	50	6,5	Сплав Д16	538	398	120	12,5	нет	изгиб
10	11	75	55	4	Сплав В95	507	474	112	40	нет	растяжение
11	III	82	74	5	Чугун СЧ28	480	-	130	12,5	нет	изгиб
12	III	60	50	3,5	Чугун СЧ21	400	-	100	20,0	нет	кручение
13	III	25	20	3,0	Сплав Д20	410	250	60	6,3	нет	растяжение
14	III	37	33	4,5	Сталь 40	550	340	240	1,25	азотир.	изгиб с кр.
15	III	20	18	0,5	Сталь 40ХН	820	650	360	6,3	ТВЧ	изгиб
16	IY	20	17	0,3	Сплав АВ	425	330	87	1,25	нет	растяжение
17	IY	35	30	2,0	Сплав Д16	538	398	120	0,63	нет	изгиб
18	IY	40	30	0,8	Сталь 40Х	730	500	320	20	ТВЧ	растяжение
19	IY	55	50	4,0	Сталь 45	650	450	300	40	нет	изгиб
20	IY	66	58	3,5	Сталь 20Х	650	400	300	12,5	цемент.	изгиб
21	Y	50	-	5	Сплав Д20	410	250	60	6,3	нет	растяжение кручение
22	Y	44	-	2,5	Сплав Д16	538	398	1,20	1,25	нет	изгиб

Продолжение табл. 6

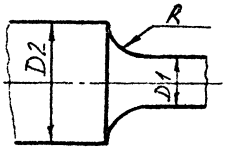
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
23	Y	30	-	1,5	Сталь 40	580	340	240	12,5	цементация	изгиб с кр.
24	YI	35	-	-	Сталь 40Х	730	500	320	6,3	нет	изгиб
25	YI	25	-	-	Сталь 45	650	450	300	12,5	ТВЧ	кручение
26	YI	42	-	-	Сталь 40ХН	820	650	360	6,3	нет	изгиб с кр.
27	YII	34	с прямозуб. шл.		Сталь 40Х	730	500	320	0,63	ТВЧ	изгиб
28	YII	26	с эвольв. шл.		Сталь 45	650	400	300	6,3	азотиров.	кручение
29	YII	22	с прямозуб. шл.		Сталь30ХГТ	1150	950	520	1,25	ТВЧ	изгиб
30	YIII	45	F = 30 МПа		Сталь 45	650	450	300	6,3	нет	кручение
31	YIII	70	F = 40 МПа		Передается	-"-	-"-	-"-	1,25	нет	изгиб
32	YIII	35	F = -5 МПа		усилие и	-"-	-"-	-"-	12,5	ТВЧ	изгиб с кр.
33	yIII	80	F = 20 МПа		кр. момент на вал	-"-	-"-	-"-	6,3	нет	-"-

Примечание. Для определения запаса прочности детали необходимо знать параметры циклического нагружения, заданные переменными напряжениями σ, τ. Рекомендуется задавать нормальные напряжения σ в пределах 10-40 МПа, изменяющиеся по симметричному циклу нагружения и τ в пределах 5-20 МПа, изменяющиеся по отнулевому циклу. Хотя могут быть и другие вариации изменения этих параметров по усмотрению преподавателя.

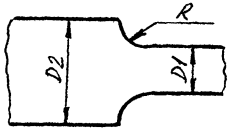
ПРИЛОЖЕНИЕ

Виды концентраторов напряжений

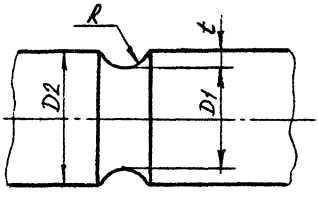
1. Ступенчатый вал с галтелью



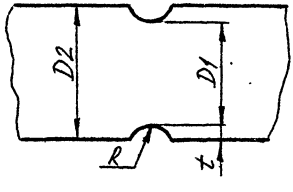
2. Симметричная ступенчатая пластина с галтелями



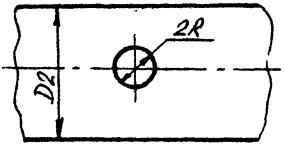
3. Вал с выточкой



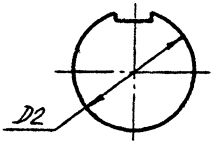
4. Симметричная пластина с двусторонним надрезом



5. Поперечное отверстие

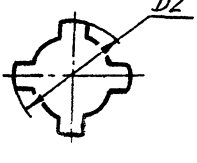


6. Шпоночный паз

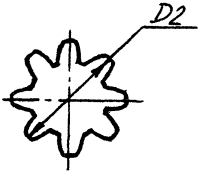


7. Шлицевой вал

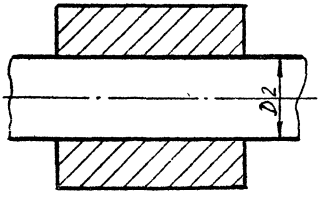
с прямозуб. шлицем



с эвольвент. шлицами



8. Напрессованная деталь на вал



СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосьев В.И. Сопротивление материалов. -М.: Наука,1979.-560 с. (390-421 с.).

2. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов.-Киев: Высшая школа, 1979.-696 с. (588-618 с.).

3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. -М: Машиностроение, 1985. -224 с.

4. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.

5. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты на прочность деталей машин.-М: Машиностроение, 1975.-488 с.

6. Гурьев А.В., Епихина Н.М. Выполнение расчетно-проектировочных и курсовых работ по сопротивлению материалов. -Волгоград: ВолгПИ, 1984. -18 с.

7. Гурьев А.В., Журкина З.П. Вопросы стандартизации в курсе "Сопротивление материалов". -Волгоград: ВолгПИ, 1985. -16 с.

8. Гурьев А.В., Савкин А.Н. Испытание металлов на усталость: Методические указания к лабораторной работе для студентов специальности "Металловедение, оборудование и технология теоретической обработки". -Волгоград: ВолгПИ, 1980, -10 с.

9. Иткис М.Я. Расчет и проектирование бурового оборудования с применением ЭЦВМ. -М.: Машиностроение, 1979. -262 с.

10. Курсовое проектирование деталей машин. С.А. Чернавский, К.Н. Боков, И.М. Чернин и др. -М.: Машиностроение, 1988. -416 с.

11. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. -М.: Мир, 1977. -302 с.

12. Бойцов Б.В. Прогнозирование долговечности напряженных конструкций. Комплексное исследование шасси самолета. -М.: Машиностроение, 1985. 188-207 с.

13. Трощенко В.Г. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении.-Киев: Наукова думка, 1981.-343 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчеты элементов машин и конструкций на выносливость при переменных нагрузках. (Усталость металлов).

1.1. Характеристика раздела "Усталость металлов"....3

1.2. Методические рекомендации по изучению раздела "Усталость металлов"....3

1.3. Расчеты на прочность при переменных нагрузках.....4

1.3.1. Основные положения. Параметры переменного нагружения. Характеристики усталостной прочности....4

1.3.2. Факторы, влияющие на сопротивление усталости деталей машин....10

1.3.3. Расчеты на выносливость по коэффициентам запаса прочности при переменном нагружении....24

1.3.4. Определение пределов выносливости деталей машин и элементов конструкций для заданной вероятности разрушения...27

1.4. Контрольные вопросы для проверки усвоения материала....27

1.5. Методика расчета деталей машин на выносливость....28

1.6. Примеры решения задач по расчету на выносливость..29

1.7. Задачи для самостоятельного решения....32

1.8. Рекомендации по изучению дополнительного материала....34

1.9. Рекомендации по использованию автоматизированной подсистемы (Ustmet) в учебном процессе....35

1.10. Задания на выполнение курсовой работы....39

Список рекомендуемых источников....43

Темплан 1996 г., поз. № 48

Алексей Николаевич Савкин

РАСЧЕТЫ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ (УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ)

Лицензия ЛР N 020251 от 31.10.1991 г.

Учебное пособие

Редактор Л.П. Кузнецова

Подписано в печать 11.03.96 . Формат 60x80x1/16.
Бумага газетная. Печать плоская. Печ. л. 3,0.
Усл. печ. л. 2,79. . Уч.-изд. л. 3,26. . Тираж 200 экз.
Заказ 139

Волгоградский государственный технический университет.
400066, Волгоград, пр.Ленина, 28.
Ротапринтный участок ВолгГТУ.
400066, Волгоград, ул. Советская, 35.