

Н. М. БОБКОВ

Лекции по общему конструированию РЭС

Раздел 2 Основы строительной механики РЭС

Лекция 2.5 УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ

1 Сокращения

РЭС – радиоэлектронное средство

РЭС-сооружение – РЭС, рассматриваемое (изучаемое, конструируемое) как строительное сооружение

2 Основные понятия

Причиной большинства поломок РЭС-сооружений является усталость их составных частей.

D1 усталость: Процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин их развитию и разрушению [1].

При испытаниях РЭС на воздействие вибрации и многократных ударов элементы РЭС-сооружений подвергаются периодическому нагружению, при котором напряжения в деталях также изменяются периодически.

D2 цикл напряжений: Совокупность последовательных значений напряжения за один период их изменений при периодическом нагружении [1].

Вопросы усталости здесь рассматриваются для периодических нормальных напряжений. В случае периодических касательных напряжений остаются в силе все приведенные здесь определения и соотношения с заменой нормальных напряжений σ на касательные напряжения τ .

Рисунок 1, *a* иллюстрирует закон изменения во времени напряжений в деталях РЭС при испытаниях на воздействие синусоидальной вибрации, рисунок 1, *б* – на воздействие многократных ударов.

Как показали исследования, прочность материала от закона изменения напряжения не зависит и определяется только наибольшим (σ_{max}) и наименьшим (σ_{min}) напряжениями цикла [2]. Циклы напряжений, изображенные на рисунке 1, при

одинаковых σ_{max} и σ_{min} с точки зрения прочности деталей являются эквивалентными. При анализе прочности элементов РЭС-сооружений можно считать, что частота изменения напряжений на прочность также не влияет.

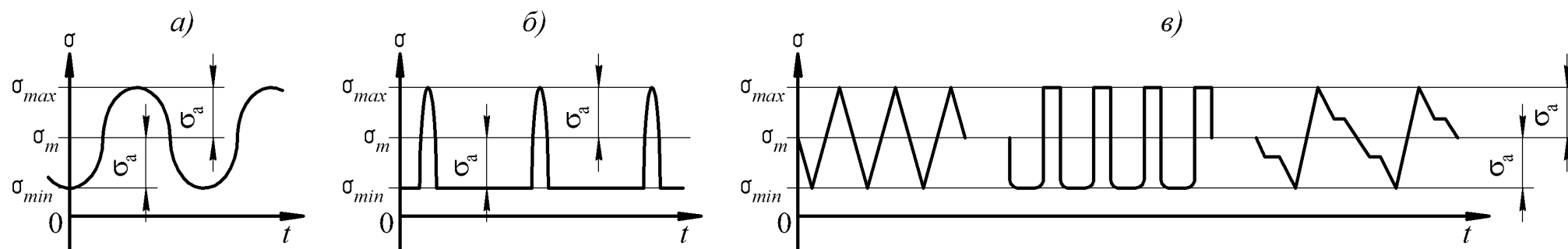


Рисунок 1 – Примеры циклов напряжений при периодическом нагружении

Цикл напряжения характеризуют:

$$\text{среднее напряжение цикла } \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}; \quad (1)$$

$$\text{амплитуда переменного напряжения } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}; \quad (2)$$

D3 сопротивление усталости: Свойство материала противостоять усталости [1].

Для оценки сопротивления усталости в условиях заданного цикла напряжений достаточно знать только величины σ_{max} и σ_{min} или σ_m и σ_a .

Еще одной характеристикой цикла напряжений является коэффициент асимметрии цикла r .

$$r = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}. \quad (3)$$

На рисунке 2 изображены циклы напряжений с различными коэффициентами асимметрии. Циклы на рисунках 2, а, б, е, ж называют знакопостоянными, а циклы на рисунках 2, в, г, – пульсирующими. На рисунке 2, з изображен симметричный цикл, у которого $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$, $r = -1$, $\sigma_m = 0$.

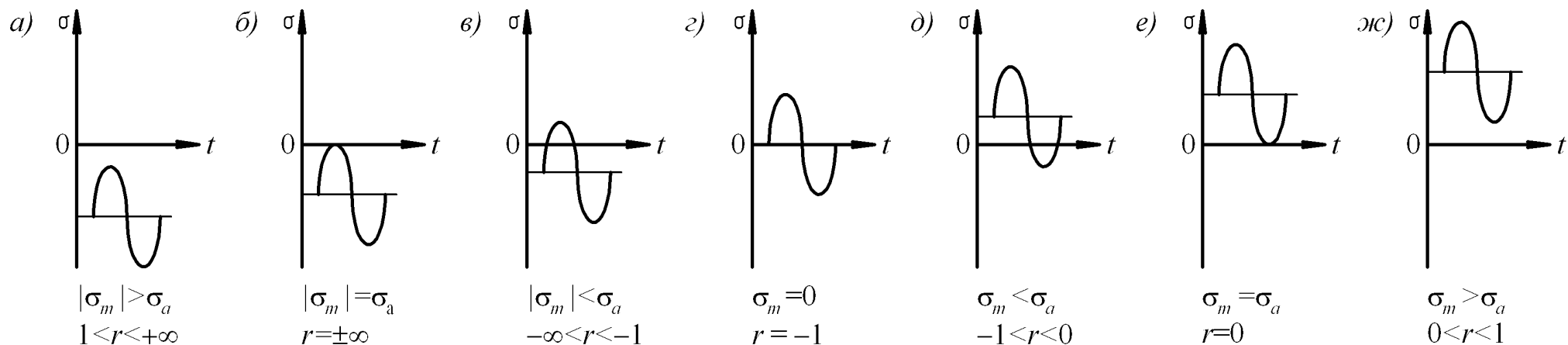


Рисунок 2 – Циклы напряжений и соответствующие им значения коэффициентов асимметрии

3 Определение характеристик сопротивления усталости

Способность материала к сопротивлению усталости определяется на испытаниях по стандарту [3]. На рисунке 3, а приведена схема машины для испытаний на усталость при чистом симметричном изгибе (эпюра изгибающих моментов – на рисунке 3, б; цикл напряжений – на рисунке 3, в). Образец 1, зажатый в цангах 2 и 3, нагруженный грузом 4, подвешенным на серьгах 5 и 6, вращается двигателем 7. Счетчик 8 фиксирует число оборотов образца. Выключатель 9 автоматически отключает двигатель при разрушении образца.

Для испытаний требуется не менее 10 образцов. Перед испытаниями устанавливают базу испытаний N_6 .

D4 база испытаний: Предварительно задаваемая продолжительность испытаний на усталость [1].

Первый образец нагружают напряжением с максимальным значением σ_1 , которое несколько меньше, чем предел прочности материала образца σ_B . При симметричном цикле максимальное напряжение равно амплитудному. Образец ломается при числе циклов N_1 . Второй образец испытывают при максимальном напряжении $\sigma_2 < \sigma_1$. Разрушение происходит при числе циклов $N_2 > N_1$. Каждый последующий образец испытывают при максимальном напряжении меньшем, чем у предыдущего образца, и разрушается при большем числе циклов, чем предыдущий. Постепенное снижение максимальных напряжений приводит к тому, что очередной образец не разрушается при достижении базы испытаний.

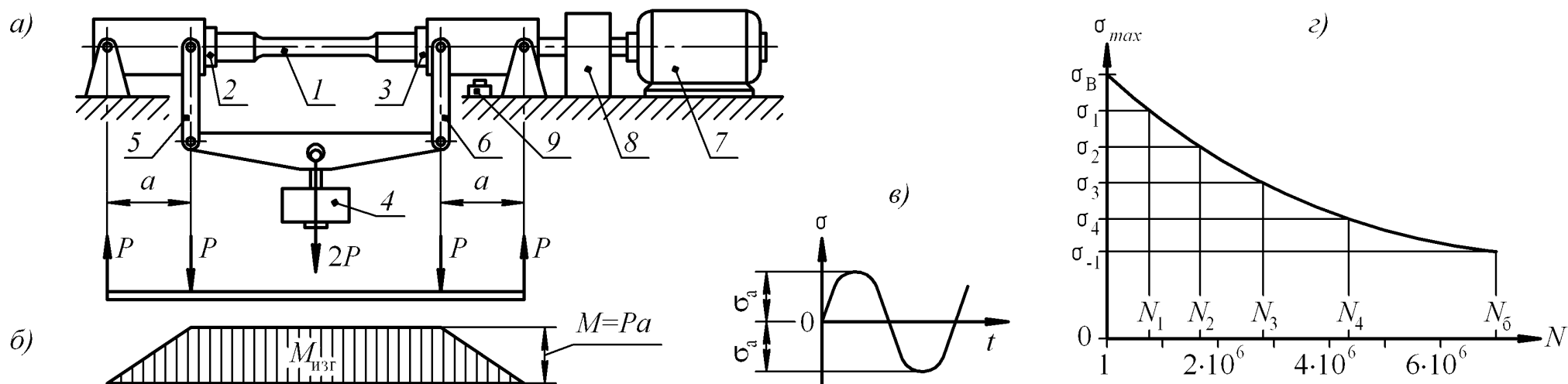


Рисунок 3 – Испытания для определения предела выносливости

По результатам испытаний строят график (рисунок 3, *д*). На графике по оси абсцисс откладывают число циклов N , которое выдержали образцы до разрушения, а по оси ординат – соответствующие значения максимальных напряжений σ_{max} .

Для большинства сталей при умеренных температурах кривая усталости, начиная с числа циклов $N \approx 10^6 - 10^7$, становится практически горизонтальной, т. е. образцы, выдержавшие указанное число циклов, не разрушатся при любом числе циклов. По стандарту [3] для таких материалов устанавливают базу испытаний $N_6 = 10^7$ циклов. Легкие сплавы, а также все металлы при высоких температурах и при испытаниях в коррозионных средах имеют кривые усталости без горизонтального участка. В этих случаях устанавливают базу испытаний $N_6 = 10^8$ циклов.

D5 предел выносливости: Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором не происходит усталостного разрушения до базы испытаний [1].

Предел выносливости при изгибе обозначают: при симметричном цикле (рисунок 2, *д*) – σ_{-1} , при пульсирующем цикле (рисунок 2, *е*) – σ_0 , при других асимметричных циклах – σ_r .

Кривая усталости на рисунке 3, *д* построена в координатах $N - \sigma_{max}$. На рисунке 4, *а* показан вид кривой усталости, построенный в логарифмических координатах $lg N - lg \sigma_{max}$. В логарифмических координатах кривая усталости может изображаться в виде ломаной линии (линия *DABC* на рисунке 4, *б*) [4]. Такое представление кривой удобно для построения ее аналитическим путем. На предприятиях радиопромышленности из-за отсутствия оборудования для испытаний на усталость аналитический способ построения кривой усталости является единственно возможным.

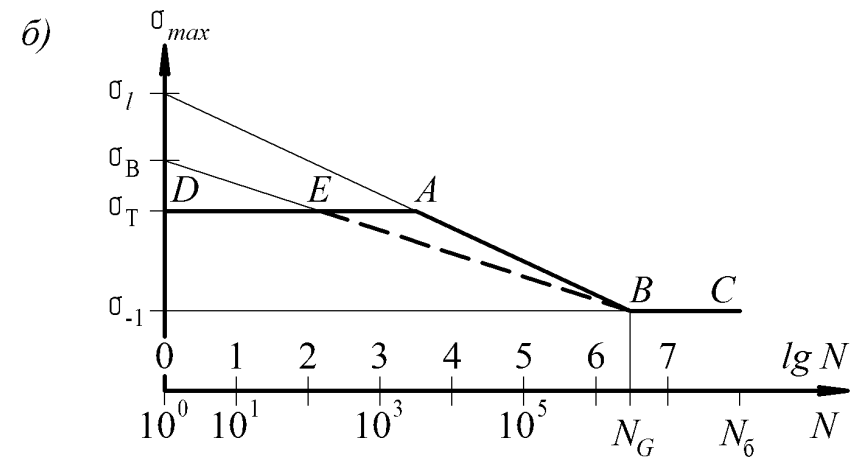
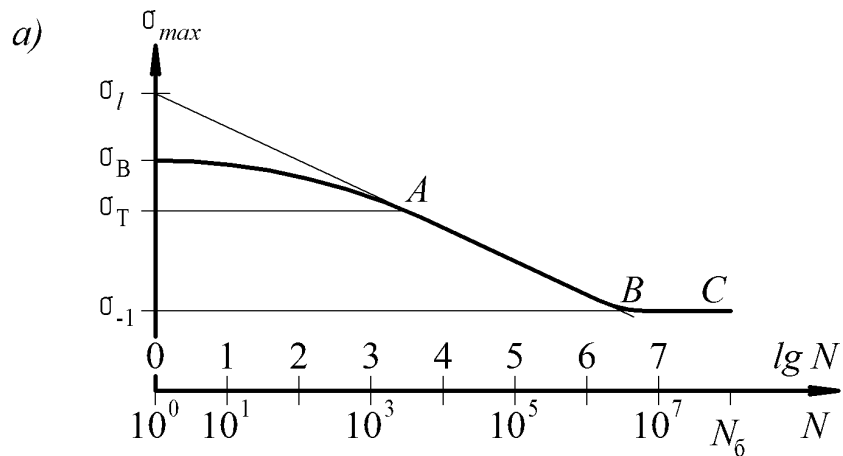


Рисунок 4 – Кривые усталости в логарифмических координатах

В справочниках обычно приводятся пределы выносливости материалов σ_{-1} , установленные путем испытаний стандартных образцов при симметричном изгибе. В отсутствие справочных данных можно воспользоваться следующими эмпирическими соотношениями [5]:

для сталей $\sigma_{-1}=(0,4 \dots 0,6)\sigma_B$, (4)

для алюминиевых сплавов $\sigma_{-1}=(0,25 \dots 0,4)\sigma_B$, (5)

для латуни $\sigma_{-1}=(0,3 \dots 0,4)\sigma_B$, (6)

для бронзы $\sigma_{-1}=(0,3 \dots 0,5)\sigma_B$. (7)

Точка пересечения продолжения наклонного участка AB кривой усталости с осью ординат соответствует напряжению σ_l , которое можно определить по формуле [6]

$$\sigma_l = \sigma_{-1} \sqrt[m]{N_G}, \tag{8}$$

где m – показатель наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах.

Расчетный метод определения показателя наклона кривой усталости приведен в стандарте [7].

Обычно $\sigma_l \approx (3 \dots 10)\sigma_{-1}$. При отсутствии данных с погрешностью, идущей в запас прочности, можно принять $\sigma_l = \sigma_B$. На

рисунке 4, б кривая усталости при таком допущении изображается линией *DEBC* [4].

Пределы выносливости при симметричном растяжении σ_{-1P} и симметричном кручении или сдвиге τ_{-1} связаны с пределом выносливости при симметричном изгибе σ_{-1} следующими ориентировочными соотношениями:

$$\sigma_{-1P}=(0,7 \dots 0,9)\sigma_{-1}, \quad (9)$$

$$\tau_{-1}=(0,3 \dots 0,4)\sigma_{-1}. \quad (10)$$

Предел выносливости при изгибе пульсирующим циклом σ_0 можно определить по формуле

$$\sigma_0=(1,4 \dots 1,6)\sigma_{-1} \quad (11)$$

Пределы выносливости конкретных деталей $\sigma_{-1Д}$ обычно меньше, чем предел выносливости стандартных образцов σ_{-1} . На предел выносливости влияют концентрация напряжений, шероховатость поверхности, абсолютные размеры детали и другие факторы. Совместное действие всех факторов оценивают коэффициентом снижения предела выносливости K .

$$\sigma_{-1Д} = \frac{\sigma_{-1}}{K} \quad (12)$$

Общий метод вычисления коэффициента K приведен в стандарте [7]. Для деталей РЭС-сооружений обычно необходимо учитывать лишь влияние концентрации напряжений и шероховатости поверхности.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ рассчитывается по формуле

$$k_\sigma = 1 + q(\alpha - 1) \quad (13)$$

где α – теоретический коэффициент концентрации напряжений

q – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений зависит только от формы детали [7] и не зависит от материала, из которого изготовлена деталь. Напротив, величина q зависит в основном от свойств металла (таблица 1) [6].

При отсутствии необходимых данных величину эффективного коэффициента концентрации напряжений для деталей из сталей можно определить приближенно по следующим эмпирическим формулам [8]:

а) при отсутствии острых концентраторов напряжений для деталей с чисто обработанной поверхностью (но не полированной и не шлифованной)

$$k_{\sigma} = 1,2 + 0,2 \frac{\sigma_B - 400}{1100} \quad (14)$$

б) при наличии острых концентраторов напряжений

$$k_{\sigma} = 1,5 + 1,5 \frac{\sigma_B - 400}{1100} \quad (15)$$

Таблица 1

Материал	q
Литые материалы и материалы с внутренними источниками концентрации и дефектами (серый чугун и др.)	0,1 ... 0,2
Литые жаропрочные сплавы, стальное и алюминиевое литье, модифицированные чугуны	0,1 ... 0,4
Низкоуглеродистые стали, жаропрочные деформируемые сплавы, аустенитные коррозионностойкие стали, алюминиевые деформируемые сплавы	0,3 ... 0,5
Среднеуглеродистые стали, низколегированные стали	0,4 ... 0,6
Конструкционные легированные стали	0,6 ... 0,7
Высоколегированные стали (типа коррозионностойких сталей мартенситного класса) титановые сплавы	0,7 ... 0,9

В формулы (13) и (14) величины σ_B следует подставлять в МПа. При использовании этих формул учитывать влияние шероховатости поверхности не требуется, т. е. при расчетах сопротивлений усталости элементов РЭС-сооружений можно коэффициент снижения предела выносливости принять равным эффективному коэффициенту концентрации напряжений $K = k_{\sigma}$. В таблице 2 приведены рассчитанные по формулам (14) и (15) коэффициенты снижения пределов выносливости для некоторых сталей.

Из таблицы 2 видно, что для наиболее применяемых в РЭС-сооружениях сталей с пределом прочности $\sigma_B \leq 600$ МПа коэффициент снижения предела выносливости $K = (1,2 \dots 1,3)$ для деталей без острых концентраторов напряжений и

$K = (1,5 \dots 1,8)$ для деталей с острыми концентраторами напряжений. Учитывая, что коэффициент чувствительности алюминиевых сплавов к концентрации напряжений не выше, чем коэффициент чувствительности к концентрации напряжений низкоуглеродистых сталей (см. таблицу 1), такие же коэффициенты снижения предела выносливости можно применять при расчетах деталей из алюминиевых сплавов.

Таблица 2

Марки сталей	Предел прочности σ_B , МПа	Рассчитанный коэффициент снижения предела выносливости K для стальных деталей	
		без острых концентраторов напряжений	с острыми концентраторами напряжений
20, А11	410	1,2	1,51
А20	450	1,21	1,57
45	600	1,24	1,77
30ХГСА	1080	1,32	2,43
12Х18Н9Т	1100	1,33	2,45

4 Циклическая долговечность элементов РЭС-сооружений

D6 циклическая долговечность: Число циклов напряжений, выдержанных объектом до образования усталостной трещины определенной продолжительности или до усталостного разрушения [1].

Расчет деталей, не предназначенных для длительного срока службы, ведется по пределу ограниченной выносливости.

D7 предел ограниченной выносливости: Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее заданной циклической долговечности [1].

Предел ограниченной выносливости определяется по наклонному участку кривой усталости в зависимости от заданной циклической долговечности.

Для наклонного участка кривой усталости (рисунок 5, а) справедливо соотношение [7]

$$\sigma_1^m N_1 = \sigma_2^m N_2, \quad (16)$$

где N_1 – циклическая долговечность при максимальном напряжении σ_1 ;

N_2 – циклическая долговечность при максимальном напряжении σ_2 .

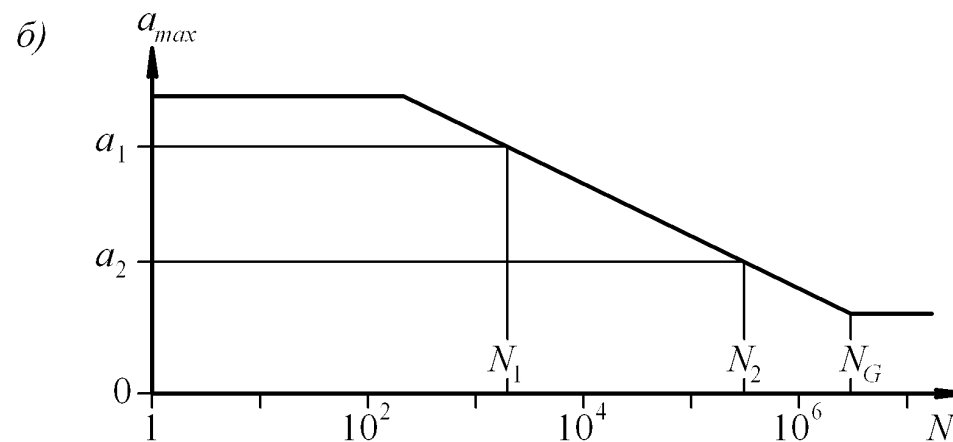
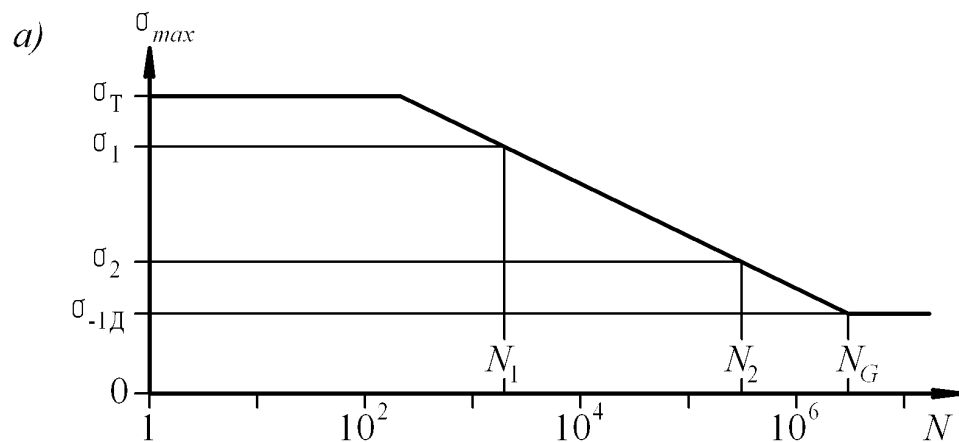


Рисунок 5 – Определение циклической долговечности деталей

Значения m колеблются в значительных пределах в зависимости от свойств материала, формы детали и коэффициента асимметрии цикла. При $r = -1$ у гладких образцов $m = 8 \dots 15$; у деталей с концентраторами напряжений $m = 3 \dots 8$ [4]. В отсутствие экспериментальных данных можно принять $m=6$ [9].

Если РЭС-сооружение с точки воздействия на него ударов и вибрации рассматривать как совокупность линейных механических колебательных систем [10], то для синусоидальной вибрации с постоянной частотой или ударов с постоянной длительностью можно считать, что напряжения в деталях прямо пропорциональны вибрационному или ударному ускорению. Тогда из соотношения (16) следует соотношение

$$a_1^m N_1 = a_2^m N_2, \quad (17)$$

где a_1 и a_2 – максимальное значение ускорения при вибрации или пиковое ускорение при ударе;

N_1 и N_2 – циклические долговечности при ускорениях a_1 и a_2 соответственно.

Вид кривой усталости, у которой по оси ординат откладываются максимальные (пиковые) значения ускорения (рисунок 5, б), будет как у кривой на рисунке 5, а. По этой кривой видно, что жесткость воздействия определяется, прежде всего, максимальными ускорениями вибрации, пиковыми ускорениями ударов и числом циклов вызываемого ими знакопеременного нагружения элементов РЭС-сооружения.

Из формулы (16) видно, что даже небольшое снижение уровня напряжения в детали существенно повышает ее циклическую долговечность. Например, чтобы при $m=6$ повысить циклическую долговечность несущей детали в два раза, необходимо снизить действующие в ней напряжения в $\sqrt[6]{2} = 1,12$ раза. В пластинке, нагруженной перпендикулярно ее плоскости, максимальные напряжения обратно пропорциональны квадрату толщины пластинки. Таким образом, для увеличения циклической долговечности шасси, имеющего форму плоской пластинки, в два раза необходимо увеличить его толщину в $\sqrt[12]{2} = 1,06$ раза. Из формулы (17) видно, что точно также небольшие изменения величины ускорения резко сказываются на циклической долговечности. Например, при $m=6$, если режимы нагружения соответствуют наклонному участку кривой усталости, 10 тысяч ударов с ускорением 150 м/с^2 (15 g) эквивалентны 114 тысячам ударов с ускорением 100 м/с^2 (10 g).

Список использованных источников

- 1 ГОСТ 23207 – 78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.
- 2 Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. М., 2016.
- 3 ГОСТ 25.502 – 79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний материалов. Методы испытаний на усталость.
- 4 Орлов П. И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 1. М., 1988.
- 5 Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Часть 1. Киев, 1987.
- 6 Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М., 1993.
- 7 ГОСТ 25.504 – 82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.
- 8 Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов: учебник для вузов. М., 1989.
- 9 Михеев Р. А. Прочность вертолетов: учебник для вузов. М., 1984.
- 10 Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. Пер. с нем. М., 1976.

Николай Михайлович Бобков – преподаватель Нижегородского радиотехнического колледжа, конструктор Нижегородского научно-производственного объединения имени М. В. Фрунзе.

E-mail: n.bobkov@mail.ru