М Е Ж Г О С У Д А Р С Т В Е Н Н Ы Й С Т А Н Д А Р Т

Расчеты и испытания на прочность в машиностроении

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

ГОСТ 25.507—85

Общие требования

Strength calculation and testing in machine building.
Methods of fatigue testing under service loading.
General requirements

МКС 19.060
ОКСТУ 0025

Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 17 июля 1985 г. № 2246 дата введения установлена

01.07.86

Ограничение срока действия снято по протоколу № 5—94 Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (ИУС 11-12—94)

Настоящий стандарт устанавливает методы испытаний на усталость при одноступенчатом, многоступенчатом и случайном нагружении в многоцикловой области натурных деталей машин и элементов конструкций (далее — деталей), изготовленных из металлов и сплавов, при:

растяжении-сжатии, изгибе, кручении и комбинированном нагружении;

наличии и отсутствии концентрации напряжений;

нормальной, повышенной и пониженной температурах;

частоте нагружения до 300 Гц;

симметричных и асимметричных циклах напряжений или деформаций;

наличии или отсутствии агрессивной среды.

Методы испытаний на усталость образцов металлов — по ГОСТ 25.502—79.

Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций — по ГОСТ 25.101—83.

Термины, применяемые в настоящем стандарте, — по ГОСТ 23207—78, ГОСТ 21878—76.

Обозначения, применяемые в настоящем стандарте, приведены в приложении 1.

Методика и примеры определения минимального числа испытуемых деталей приведены в приложении 2.

Методика пересчета долговечности по линейной гипотезе суммирования повреждений приведена в приложении 3.

Характеристики рассеяния при долговечности с логарифмически нормальным распределением приведены в приложении 4.

Настоящий стандарт унифицирован со стандартом ГДР ТГЛ 19355.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Целью испытаний является:

обеспечение требуемой надежности и долговечности деталей при их минимальной металлоемкости с минимальными материальными и технологическими затратами для заданной достоверности и выборки относительно малого объема;

установление характеристик сопротивления усталости и ранжирование деталей по этим характеристикам;

Издание официальное **Перепечатка воспрещена**

★

Переиздание.

gost.e-ecolog.ru

получение исходных данных для определения показателей надежности и запасов прочности;

расчет остаточного ресурса после определенной наработки или при наличии усталостных повреждений;

опережающая проверка и обоснование конструкции детали и технологии ее изготовления до начала серийного производства;

выборочный входной или выходной контроль ответственных деталей перед их эксплуатацией;

проведение испытаний как периодических и типовых;

обеспечение данных для аттестации качества деталей;

сравнение деталей по скорости роста в них усталостных трещин;

выявление зон с пониженным сопротивлением усталости.

1.1.1. Области применения различных типов испытаний на усталость приведены в табл. 1.

Таблица 1

Области применения различных типов испытаний на усталость

Цель испытания	Метод испытания			
Определение предела выносливости или предела ограниченной выносливости	A_1	—	—	—
Определение параметров кривой усталости (Велера)	A_1	—	—	—
Оптимизация детали и технологии различных конструктивных, технологических, материальных и ремонтно-технических вариантов (сравнительные испытания)	A_1	*В*	*С*	—
Обнаружение слабых мест	A_1	*В*	*С*	—
Выбор материала детали	A_1	*В*	*С*	—
Определение значений характеристик рассеяния	A_1	*В*	*С*	—
Определение данных для назначения размеров детали	—	*В*	*С*	—
Определение предела ограниченной выносливости при эксплуатационном нагружении	—	*В*	*С*	*Д*
Определение долговечности	A_1	*В*	*С*	*Д*
Построение кривой усталости при эксплуатационном нагружении	—	*В*	*С*	*Д*

Примечание. A_1 — одноступенчатое испытание (испытание по Велеру); *В* — блок-программное испытание; *С* — случайное испытание с цифровым моделированием последовательности экстремумов; *Д* — случайное испытание со слежением.

1.2. Определяемые характеристики — по ГОСТ 25.502—79 и ГОСТ 25.504—82.

1.3. Испытания на усталость проводят в случае, если расчетные методы определения характеристик сопротивления усталости не применимы или слишком ненадежны.

1.4. Испытания деталей или их частей следует проводить до изготовления конструкции в сборе с целью сокращения времени на ее разработку.

1.5. Назначение размеров детали (с помощью испытаний на усталость) осуществляют в три этапа:

предварительное расчетное определение размеров;

оптимизация размеров экспериментальным путем с помощью упрощенного процесса нагружения (сравнительные испытания);

оценка усталостной долговечности детали при нагружении, максимально приближенном к эксплуатационному.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕКТАМ ИСПЫТАНИЙ И ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

2.1. Для усталостных испытаний используют детали, а также геометрически подобные конструктивные элементы (модели) уменьшенных размеров или отдельные, вырезанные из детали, части, исходя из особенностей испытательного оборудования, затрат времени и средств.

2.2. Требования к изготовлению деталей и моделей должны соответствовать требованиям серийного (или опытного) производства.

2.3. Влияние размеров детали на предел выносливости при отсутствии экспериментальных данных следует определять по ГОСТ 25.504—82.

2.4. При испытании на усталость геометрически подобных моделей уменьшенных размеров или частей детали следует учитывать:

геометрическое влияние размеров, как следствие уменьшенного объема материала (статистическая доля) и увеличенного градиента напряжений (доля механических напряжений);

технологическое влияние размеров, как следствие технологической обработки материала или детали;

влияние размеров с точки зрения обработки поверхности, как следствие упрочнения поверхности и связанного с ним внутреннего напряженного состояния и увеличения твердости поверхностного слоя материала.

2.5. Для построения кривых равной вероятности неразрушения испытывают партию деталей, объем которой определяют в зависимости от целей испытаний, заданной точности и доверительной вероятности оцениваемого параметра, в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502—79.

2.6. Минимально необходимое число деталей определяют по номограмме, приведенной на чертеже приложения 2.

2.7. Методика и примеры определения минимального числа испытуемых деталей для оценки среднего ресурса приведены в приложении 2.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ

3.1. Характеристики нагружения

Эксплуатационное нагружение может быть охарактеризовано:

характером нагружения (случайное, детерминированное одно- или многоступенчатое, квазистатическое, колебательное, ударное);

числом наложенных многоосных составляющих и отношениями между ними (при случайном нагружении — коррелированные или некоррелированные; при детерминированном нагружении — различные или одинаковые частоты, со сдвигом или без сдвига фаз);

регулированием усилия, перемещения, деформации или ускорения;

частотой;

параметрами окружающей среды (температурой, давлением, коррозией трения);

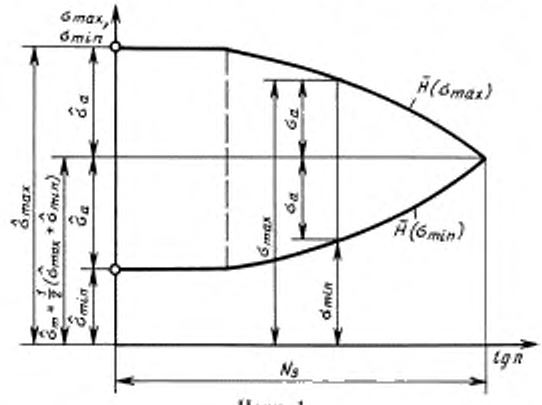
видом нагружения (растяжение-сжатие, изгиб, кручение, сдвиг);

асимметрией нагружения (знакопеременный или знакопостоянный цикл напряжений);

формой спектра (распределения) нагрузок (узкополосный или широкополосный).

Характеристики однопараметрического спектра нагружения с постоянным средним значением цикла напряжений приведены на черт. 1.

Характеристики однопараметрического спектра нагружения с постоянным средним значением цикла напряжений



Черт. 1

Примечание. Форму спектра описывают с помощью дополнительной функции частоты максимумов $\bar{H}(\sigma_{max})$ и функции частоты минимумов $\bar{H}(\sigma_{min})$.

3.2. Стандартные спектры нагружения

3.2.1. Если испытания на усталость проводят не с действительным спектром или действительной последовательностью экстремумов (на стадии проекта, при сравнительных испытаниях, при разработке документации на определение размеров, при незначительном отклонении действительного нагружения), то их осуществляют со стандартными спектрами (при испытании по блок-программе), а также со стандартными последовательностями экстремумов (при случайном испытании).

3.2.2. Использование стандартных спектров или стандартных последовательностей экстремумов дает следующие преимущества:

лучшую сравнимость результатов испытаний;

возможность использования имеющихся результатов испытаний;

возможность создания обобщающих положений для рекомендаций по назначению размеров;

возможность проведения испытания на усталость на стадии проекта без точного знания действительного нагружения.

Стандартные спектры или стандартные последовательности экстремумов применяют для постоянного или малоизменяющегося основного нагружения.

3.2.3. Долговечность, определенную экспериментально с помощью стандартного спектра нагружения допускается пересчитывать по линейной гипотезе суммирования повреждений (см. приложение 3) или другими более точными методами расчета долговечности, соответствующей реальному спектру нагружения.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Характер и виды реализации нагружения

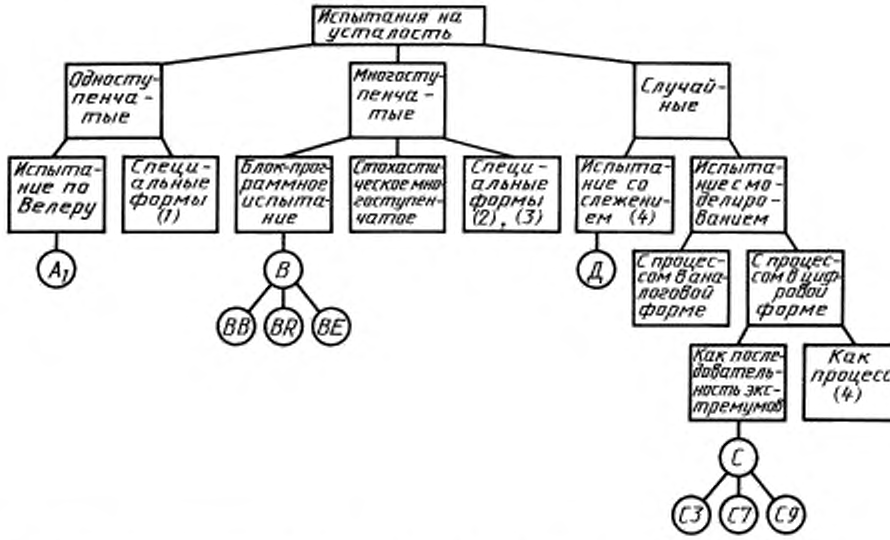
4.1.1. Испытания на усталость в зависимости от формы спектра нагружения и вида его реализации в соответствии с черт. 2 проводят как:

одноступенчатые (испытания по Велеру);

многоступенчатые (испытания по блок-программе);

случайные (испытания при эксплуатационных нагрузках), т. е. испытания со слежением; испытания с аналоговым представлением процесса нагружения и испытания с цифровым представлением последовательности экстремумов.

Методы испытаний на усталость



1 — методы «лестницы» и «ограничения»; *2* — методы Локати и Про; *3* — двухступенчатое испытание; *4* — метод со многими составляющими определенной корреляции; A_1, *B*, *C*, *Д* — см. примечание к таблице 1; *BB* — биномиальное распределение; *BR* — распределение Рэлея; *BE* — экспоненциальное распределение; *C3*; *C7*; *C9* — стандартные последовательности экстремумов соответственно для двухчастотного, широкополосного и узкополосного процессов нагружения

Черт. 2

4.2. Одноступенчатые испытания (испытания по Велеру)

4.2.1. Одноступенчатые испытания осуществляют с помощью циклов нагружения постоянной амплитуды и постоянного среднего значения напряжения цикла (регулярное нагружение).

4.2.2. При сравнительных испытаниях, если применяют регулярное нагружение вместо нерегулярного эксплуатационного режима нагружения, следует обращать внимание на правильный выбор уровня нагружения.

4.3. Многоступенчатые испытания (испытания по блок-программе)

4.3.1. Испытания на усталость проводят с нагружениями в форме управляемых по программе однородных блоков. Каждый блок состоит из определенного количества ступеней. На каждой ступени воспроизводят регулярное нагружение одного уровня. Числа циклов, амплитуды и средние значения напряжений для отдельных ступеней должны соответствовать представительному спектру нагружения.

Преимущества и недостаток испытаний при блочном нагружении по сравнению со случайными испытаниями следующие:

преимущества:

возможность накопления большого числа экспериментальных данных;

простота реализации на экономичных резонансных испытательных машинах;

недостаток — менее надежные значения долговечности.

4.3.2. Спектр нагружения подразделяют на 6—8 ступеней (если другая градация ступеней не вызвана условиями эксплуатации) с тем, чтобы влияние ступеней на долговечность было незначительным.

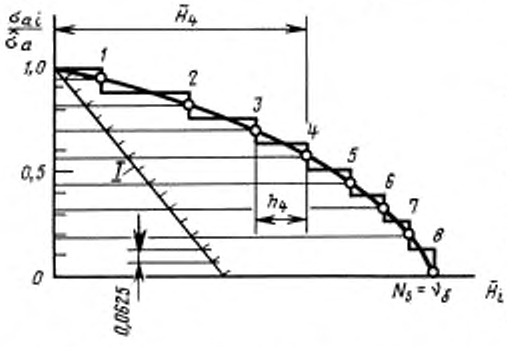
Разбивку на ступени осуществляют линейно (черт. 3) или на основе известных законов накопления усталостных повреждений.

Различные формы спектра сравнивают с помощью меры полноты V, определяемой по формуле

$$V = \sqrt[m]{\frac{1}{n} \Sigma h_i \left(\sigma_{ai} / \hat{\sigma}_a\right)^m}. \qquad (1)$$

Числа циклов в отдельных ступенях округляют до значений, кратных 2 или 10.

Линейное разбиение спектра нагружения на 8 ступеней



I — отрезок вспомогательной прямой, разделенный на 16 равных частей; *1—8* — ступени блока

Ступень блока i	$\sigma_{ai} / \hat{\sigma}_a$	$\overline{H}_i$	h_i
1	1,000	$\overline{H}_1$ при $\sigma_{a1}/\hat{\sigma}_a = 0{,}9375$	$h_i = \overline{H}_i - \overline{H}_{i-1}$
2	0,875	$\overline{H}_2$ при $\sigma_{a2}/\hat{\sigma}_a = 0{,}8125$	
3	0,750	$\overline{H}_3$ при $\sigma_{a3}/\hat{\sigma}_a = 0{,}6875$	
4	0,625	$\overline{H}_4$ при $\sigma_{a4}/\hat{\sigma}_a = 0{,}5625$	
5	0,500	$\overline{H}_5$ при $\sigma_{a5}/\hat{\sigma}_a = 0{,}4375$	
6	0,375	$\overline{H}_6$ при $\sigma_{a6}/\hat{\sigma}_a = 0{,}3125$	
7	0,250	$\overline{H}_7$ при $\sigma_{a7}/\hat{\sigma}_a = 0{,}1875$	
8	0,125	$\overline{H}_8 = N_s$ при $\sigma_{a8}/\hat{\sigma}_a = 0$	

Черт. 3

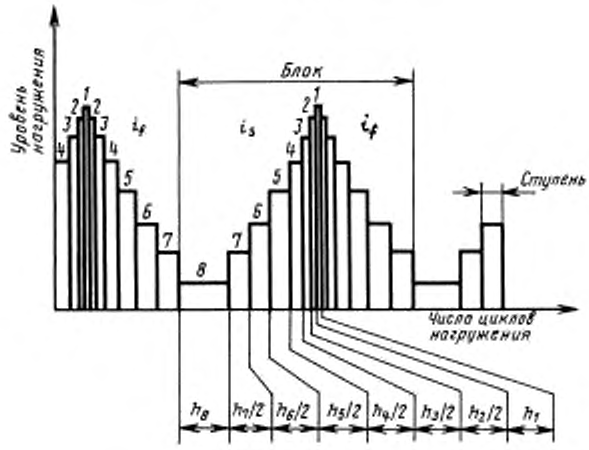
Примечание. Самой низкой ступенью $\sigma_{a8}/\hat{\sigma}_a = 0{,}125$ можно пренебречь, если максимальная амплитуда спектра $\hat{\sigma}_a$ лежит выше σ_{-1a}.

4.3.3. Размер блоков выбирают таким образом, чтобы число блоков до разрушения было не менее 10. Это относится также к случаю, если максимальное значение распределения нагрузок содержится лишь в одном или нескольких блоках.

При числе блоков до разрушения менее 10 следует учитывать влияние последовательности отдельных ступеней на долговечность.

Ступени каждого блока сменяют последовательно в порядке возрастания и понижения. Испытания начинают со средней ступени блока в соответствии с черт.4.

Блочное нагружение



Черт. 4

При монотонно возрастающем (понижающемся) прохождении получаются завышенные (заниженные) значения долговечности, а различия уменьшаются с увеличением числа блоков. При бóльшем числе блоков точность оценки эксплуатационной долговечности повышается. Если при небольшом числе блоков до разрушения последний блок реализуют не полностью, то его эффективную долю в повреждении допускается оценивать в соответствии с табл. 2.

Число циклов до разрушения получают из числа блоков, выдержанных до разрушения и объема блоков $v_б$. До последнего блока, реализованного не полностью, эффективную долю в числе циклов до разрушения допускается определять при учете расчетных долей повреждения отдельных ступеней ΔD_i по формуле

$$\Delta D_i = \frac{(\sigma_{ai}/\hat{\sigma}_a)^m \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{k} (\sigma_{ai}/\hat{\sigma}_a)^m \cdot h_i}. \qquad (2)$$

Таблица 2

Доли повреждений ΔD_i для отдельных ступеней внутри одного блока

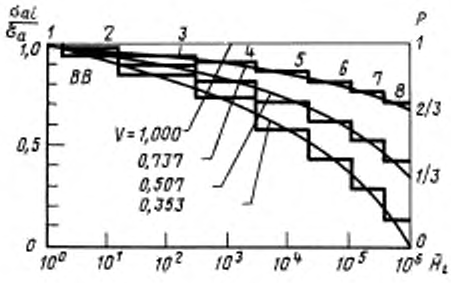
Ступень блока i	$\frac{\sigma_{ai}}{\hat{\sigma}_a}$	ΔD_i	$\Sigma \Delta D_i$	Ступень блока i	$\frac{\sigma_{ai}}{\hat{\sigma}_a}$	ΔD_i	$\Sigma \Delta D_i$
4*s*	0,725	0,05	0,05	5*f*	0,575	0,14	0,26
3*s*	0,850	0,01	0,06	6*f*	0,425	0,19	0,45
2*s*	0,950	0,00	0,06				
1	1,000	0,00	0,06	7*f*	0,275	0,10	0,55
2*f*	0,950	0,00	0,06	8	0,125	0,02	0,57
3*f*	0,850	0,01	0,07	7*s*	0,275	0,10	0,67
4*f*	0,725	0,05	0,12	6*s*	0,425	0,19	0,86
				5*s*	0,575	0,14	1,00

4.3.4. Стандартные спектры нагрузок

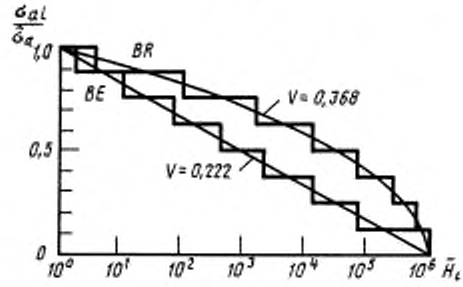
Объем стандартного спектра нагрузок — 10^6 циклов (черт. 5), а объем блока нагружения может составлять 10^4—10^6 циклов.

Стандартные спектры нагружения для блок-программного испытания

Биномиальное распределение (*BB*)



Распределения Рэлея (*BR*) и экспоненциальное (*BE*)



Ступень блока i	$\sigma_{ai}/\hat{\sigma}_a$			h_i	$\overline{H}_i$
	$p = 0$	$p = 1/3$	$p = 2/3$		
1	1,000	1,000	1,000	2	2
2	0,950	0,967	0,983	16	18
3	0,850	0,900	0,950	280	298
4	0,725	0,817	0,908	2720	3018
5	0,575	0,717	0,858	20000	23000
6	0,425	0,617	0,803	92000	115000
7	0,275	0,517	0,758	280000	395000
8	0,125	0,417	0,708	605000	1000000

Ступень блока i	$\sigma_{ai}/\hat{\sigma}_a$	*BR*		*BE*	
		h_i	$\overline{H}_i$	h_i	$\overline{H}_i$
1	1,000	4	4	2	2
2	0,875	100	104	10	12
3	0,750	1400	1500	64	76
4	0,625	11500	13000	340	416
5	0,500	58000	71000	2000	2400
6	0,375	188000	259000	11000	13400
7	0,250	356000	615000	61600	75000
8	0,125	385000	1000000	925000	1000000

Черт. 5

Примечание. Для меньших объемов блока, равных, например, 5×10^5, 10^5 и 10^4 циклов, числовые значения h_i и H_i делят на 2, 10 и 100 соответственно и округляют до целых чисел.

4.3.5. Сравнение результатов блок-программных и случайных испытаний осуществляют только со ссылкой на фактические спектры нагружения и способ схематизации.

Результаты блок-программного испытания по сравнению с результатами сравнимого случайного испытания дают погрешность не в запас прочности. Погрешность возрастает с увеличением числа блоков, так как кривая долговечности блок-программного испытания имеет более пологий наклон, чем кривая случайного испытания. Отличие результатов блок-программного испытания от случайного испытания вытекает прежде всего из незарегистрированного влияния последовательности напряжений и из влияния неучтенных изменений среднего напряжения. Степень отличия зависит от проведения блок-программного и случайного испытаний, параметров случайного процесса и от метода схематизации, а также от других факторов нагружения, конструкции и материала детали.

Влияние последовательности возрастает с уменьшением полноты спектра. Для узкополосного процесса с нормальным распределением и, следовательно, рэлеевского распределения максимумов, долговечность (предел ограниченной выносливости при эксплуатационном нагружении) при блок-программном испытании в среднем в 3,5 (1,2) раза больше, чем те же характеристики при случайном испытании.

4.4. Случайные испытания (испытания при эксплуатационных нагрузках)

4.4.1. Случайные испытания со слежением

Испытания на усталость с процессами нагружения, параметры которых измеряют при эксплуатации, регистрируют на магнитной ленте и с незначительными изменениями отслеживают на электрогидравлическом или электродинамическом испытательном оборудовании. Нагружение фиксирует представительный участок общего нагружения и повторяется многократно.

Преимущества и недостатки случайных испытаний со слежением по сравнению со случайными испытаниями с моделированием следующие:

преимущества:

весьма точное определение долговечности,

возможность отказаться от статического описания нагружения,

требуются лишь минимальные знания о действии и связях различных влияющих факторов;

недостатки:

необходимость измерения параметров нагружения детали (опытного образца или предшествующей модели),

длительное время испытаний,

ограниченная переносимость и обобщаемость результатов.

4.4.2. Случайные испытания с аналоговым моделированием процесса

Испытания на усталость с процессами нагружения, которые воспроизводят с помощью генераторов шума, реализуют на электросервогидравлическом или электродинамическом испытательном оборудовании. Исходные сигналы генераторов шума являются стационарными процессами с нормальным распределением, статистические характеристики которых (например коэффициент нерегулярности и стандартное отклонение) формируются таким образом, чтобы они совпадали с характеристиками представительных процессов эксплуатационного нагружения.

Преимущество и недостатки случайных испытаний с аналоговым моделированием процесса по сравнению со случайными испытаниями с цифровым моделированием процесса нагружения следующие:

преимущество:

простая возможность проведения некоррелированных многокомпонентных испытаний;

недостатки:

меньшая сравнимость результатов, так как выходной сигнал не строго воспроизводимый;

сложная реализация настационарных процессов нагружения.

4.4.3. Случайные испытания с цифровым моделированием процесса

4.4.3.1. Испытания на усталость с процессом нагружения, который задают как строго воспроизводимую последовательность экстремумов с помощью управляющей вычислительной машины, реализуют на электросервогидравлическом испытательном оборудовании. Процесс нагружения является случайной последовательностью экстремумов постоянного временного промежутка, которые связаны косинусоидами. Статистические характеристики последовательности соответствуют характеристикам представительного процесса эксплуатационного нагружения.

4.4.3.2. Последовательность экстремумов генерируют с помощью корреляционной таблицы, представляющий собой результат двухпараметрической схематизации по ГОСТ 25.101—83.

4.4.3.3. Стандартные последовательности экстремумов объемом 10^4—10^6 максимумов соответствуют стационарным процессам с нормальным распределением (черт. 6). Стандартную последовательность экстремумов *C*9 вследствие незначительных колебаний мгновенных средних значений используют для исследования влияния последовательности. Сравнение осуществляют с блок-программным испытанием (см. черт. 6) по стандартному спектру *BR*, имеющему одинаковые распределения максимумов, а также по стандартному спектру *BB* ($\rho = 0$), имеющему близкие распределения максимумов и минимумов.

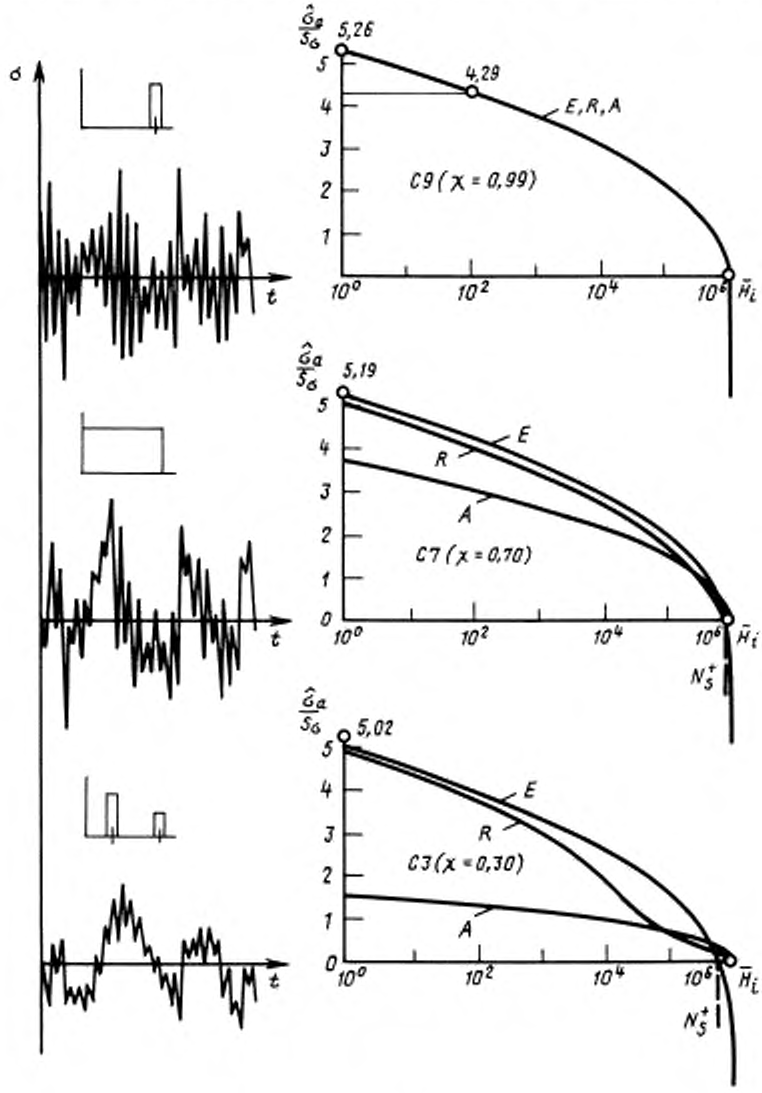
Сравнение спектров (табл. 3) осуществляют с помощью меры полноты *V*, определяемой по формуле (1), коэффициента нерегулярности χ и числа положительных максимумов N_s^+, определяемого по формуле (3)

$$N_s^+ = \frac{1+\chi}{2} \cdot N_s . \qquad (3)$$

Таблица 3

Стандартная последовательность экстремумов	χ	$\frac{N_s^+}{N_s}$	Мера полноты *V* по методам схематизации		
			E	*R*	*A*
C9	0,99	1,00	0,37	0,27	0,37
C7	0,70	0,85	0,35	0,32	0,27
C3	0,30	0,65	0,33	0,25	0,12

Стандартные последовательности экстремумов для случайного испытания и спектры нагружения



Черт. 6

Примечание. Представленные спектры (*E*, *R* и *A*) имеют объем $N_s = 10^6$; $\hat{\sigma}_a/S_\sigma = \sqrt{2 \ln N_s \cdot \chi}$,

где $\chi = n_0/N_s$ — коэффициент нерегулярности;

n_0 — число пересечений процессом уровня средней нагрузки.

Для меньшего объема спектра N_s, равного, например, 5×10^5, 10^5, 10^4, значения $\hat{\sigma}_a/S_\sigma$ уменьшаются. Так, для стандартной последовательности экстремумов *C*9 при $N_s = 10^6$, получаем $\hat{\sigma}_a/S_\sigma = 5{,}26$, а при $N_s = 10^4$ — $\hat{\sigma}_a/S_\sigma = 4{,}29$.

4.4.3.4. Для последовательностей экстремумов с коэффициентом нерегулярности χ, близким к единице (например стандартная последовательность экстремумов *C*9), получают минимальные значения долговечности. Для меньших значений χ (например стандартная последовательность экстремумов *C*7) получают несколько бóльшие значения. Лишь очень малые значения χ дают

значительно бо́льшие значения характеристик сопротивления усталости (например, для стандартной последовательности экстремумов *С*3 долговечность или предел ограниченной выносливости при эксплуатационном нагружении по сравнению с последовательностью *С*9 в среднем в 1,50 и 1,15 раза больше соответственно).

Приближенное равенство результатов для не очень малых значений χ отсутствует для заклепочных и резьбовых соединений.

4.5. Ускоренные испытания на усталость

4.5.1. Для сокращения времени испытаний допускается разрабатывать мероприятия по их ускорению при неизменном критерии предельного состояния детали. В противном случае значения долговечности, полученные для изменяющихся условий, должны быть пересчитаны с достаточной точностью на значения для первоначальных условий (см. приложение 3).

Ускоренные испытания применяют прежде всего для испытания с целью выявления слабых мест и сравнительных испытаний.

При действии зависимых от времени факторов (коррозии, колебательных процессов и т. п.) мероприятия по ускорению испытаний не допускаются.

Для заклепочных и резьбовых соединений они допустимы условно.

4.5.2. Ускорения испытаний достигают за счет следующих изменений параметров нагружения:

повышения частоты испытаний;

исключения малых неповреждающих амплитуд (в зависимости от значения предела выносливости при нерегулярном нагружении амплитуды менее 10 %—30 % абсолютного максимума спектра могут быть опущены из рассмотрения как неповреждающие (черт. 7). При приближенных оценках допускается использовать в качестве границы повреждения соотношение

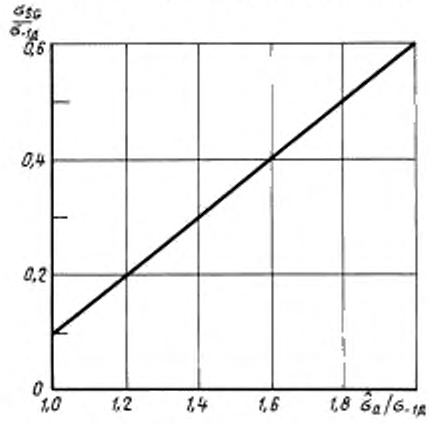
$$\sigma_{SG}/\sigma_{-1д} = 0{,}5 - 0{,}7.$$

Подобным образом можно пренебречь малыми экстремумами и при случайных испытаниях);

повышения интенсивности спектра (пропорциональное увеличение всех значений нагрузки). Повышение напряжений на 10 % сокращает долговечность в 1,5—2,0 раза;

повышения полноты спектра (дополнительно к отбрасыванию малых амплитуд).

Значения повреждающих амплитуд σ_{SG} в зависимости от максимальной амплитуды спектра $\hat{\sigma}_a$ и предела выносливости $\sigma_{-1д}$



Черт. 7

4.5.3. В целях ускорения испытаний применяют также параллельное по времени раздельное испытание на усталость деталей одного узла.

4.5.4. Для определения предела выносливости существуют следующие возможности ускоренного испытания на усталость:

определение предела выносливости путем экстраполяции левой ветви кривой многоцикловой усталости;

метод ступенчатого увеличения нагрузки — метод Локати.

4.5.5. На стадиях подготовки и проведения усталостных испытаний общее сокращение их длительности и материальных затрат достигают:

использованием статистических методов планирования экспериментов;

предварительным тщательным отбором вариантов по результатам лабораторных, статических, тензометрических и физических испытаний;

выбором сокращенной базы испытаний;

использованием сравнительных испытаний на долговечность;

выбором критерия прекращения испытаний;

выбором допустимой повышенной частоты испытаний;

использованием методов ускоренной (приближенной) оценки значения предела выносливости при испытании малого числа деталей;

выбором обоснованных форсированных режимов нагружения;

увеличением числа одновременно испытуемых на одной установке деталей;

проведением параллельных испытаний на нескольких установках при условии их идентичности по тарировке;

использованием структурной периодичности в конструкции путем последовательного испытания повторяющихся в ней несущих элементов (стоек, отсеков цилиндров в блок-картерах двигателей внутреннего сгорания, колен в коленчатых валах, зубьев в шестернях и др.). При этом разрушение одного из элементов не должно влиять на напряженное состояние другого.

4.5.6. При определении ограниченного предела выносливости и сравнительной долговечности деталей с различным конструктивным и технологическим исполнением кривые усталости могут иметь различный наклон. Поэтому при выборке коэффициента форсирования по нагрузке следует учитывать возможность пересечения их левых ветвей.

4.5.7. Ускоренное определение сравнительной долговечности двух или более вариантов при повышенных нагрузках выполняют следующим образом.

4.5.7.1. Проводят испытания при двух уровнях напряжений с тем, чтобы по наклону линий, соединяющих сравниваемые варианты, можно было судить о том, что испытания проводят ниже точки возможного пересечения кривых.

4.5.7.2. Если отрезки линий расходятся книзу или параллельны друг другу, то уровни напряжений выбраны правильно и сравнение вариантов на любом из них правомочно, т. е. соотношение между долговечностью сравниваемых вариантов (их ранжировка) не изменится при увеличении базы испытаний. Если отрезки линий сходятся, то уровни напряжений выбраны неудачно и следует их снизить.

Примечание. Точка пересечения кривых усталости в отдельных случаях может лежать на горизонтальной ветви одной из них или кривые могут пересекаться дважды.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ИСПЫТАТЕЛЬНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

5.1. Испытания могут проводиться как на стандартных испытательных машинах, соответствующих требованиям ГОСТ 28841—90, так и на нестандартном оборудовании. В случае использования нестандартного оборудования следует руководствоваться общими требованиями, изложенными в настоящем разделе.

Допустимые погрешности испытательного оборудования — по ГОСТ 25.502—79.

5.2. Приспособление должно максимально воспроизводить действительное крепление и нагружение исследуемой детали в конструкции. По возможности необходимо использовать сопрягаемые детали узла реальной конструкции для крепления и нагружения испытуемой детали.

5.3. Для сокращения затрат и времени на переналадку приспособление рекомендуется выполнять по модульному принципу.

5.4. Испытания проводят на машинах, установках и стендах:

с жестким и (или) мягким нагружением;

с различным способом возбуждения переменных нагрузок (гидравлическим, электрогидравлическим, электромагнитным, механическими центробежными вибраторами, компрессионным, путем подвешивания грузов и др.);

оснащенных средствами измерения, прошедшими поверку;

удовлетворяющих метрологическим требованиям по параметрам частоты нагружения, возбуждающего усилия и жесткости нагружаемой системы (испытательная машина — объект испытаний).

5.5. Контроль нагружения осуществляют по показаниям силоизмерительных устройств и (или) тензорезисторов.

5.6. Машины, установки и стенды должны быть оборудованы:

автоматическим выключателем, фиксирующим момент достижения предельного состояния детали;

счетчиком числа циклов;

приспособлением для проверки точности показаний машины и ее характеристик;

аппаратурой для автоматической записи (регистрации) исполнительного режима нагружения.

5.7. Опорно-захватные устройства должны обеспечивать приложение нагрузки в соответствии со схемой, предусмотренной программой испытаний, и не вызывать разрушения детали в месте передачи нагрузки.

5.8. Нагрузки при мягком нагружении или деформации при жестком нагружении должны быть в пределах от 0,2 до 0,8 выбранного диапазона измерений испытательной машины, установки или стенда.

6. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

6.1. За основные критерии предельного состояния детали принимают:

полное или частичное (определяемое появлением трещины наперед заданного размера) разрушение;

критическое раскрытие трещины (при учете скорости роста трещины, остаточной прочности материала при существующей трещине и возможного перераспределения напряжений);

потерю герметичности;

значительный рост деформации детали;

резкое падение нагрузки, внутреннего давления или частоты нагружения (на резонансной испытательной машине);

резкий подъем температуры испытуемой детали;

достижение наперед заданной скорости роста усталостной трещины;

достижение наперед заданного числа циклов нагружения;

достижение наперед заданных значений характеристик, обнаруживаемых электрическими, магнитными, ультразвуковыми, акустическими и др. методами.

6.2. Воспроизведение нагружения

6.2.1. Испытания по определению усталостной долговечности или ее минимальных значений проводят с помощью приближенных к эксплуатации спектров нагружения как случайное или блочное нагружение.

6.2.2. Для сравнительных испытаний и для испытаний по обнаружению слабых мест нагружение допускается упрощать до многоступенчатого или одноступенчатого при следующих условиях:

а) изменение в детали должно изменять полученную долговечность или кривую Велера в такой же степени, как и при случайном нагружении;

б) путем правильного выбора уровня нагружения при одноступенчатом нагружении должно выявляться такое слабое место, которое является также критическим в эксплуатации, в результате чего по расположению и внешнему виду возникают повреждения, подобные эксплуатационным.

6.2.2.1. В заклепочных и резьбовых соединениях упрощенные нагружения могут привести к измененным механизмам передачи нагрузки.

6.2.3. Точное по времени воспроизведение нагружения не требуется, за исключением случаев наличия зависящих от времени влияний:

окружающей среды (например коррозии);

нагрева детали при более высокой частоте;

скорости нагружения.

Если частоты нагружения лежат вблизи собственных частот детали, то следует учитывать динамическую переходную характеристику детали и испытательного устройства.

6.2.4. Частота нагружения при испытаниях, по возможности, должна соответствовать эксплуатационной частоте. Малые частоты (менее 1 Гц) по сравнению с обычными испытательными частотами (от 10 до 300 Гц) дают числа циклов до разрушения в 1,5—2,5 раза меньше, а предел выносливости — на 10 %—20 % меньше. Высокие частоты (более 300 Гц) приводят при охлаждении детали к повышению предела выносливости, а при отсутствии охлаждения — к его снижению.

В случае мягкого нагружения (при контроле по нагрузкам) увеличение частоты выше 10 Гц приводит к более существенному повышению долговечности по сравнению с жестким нагружением прежде всего за счет несоответствия скоростей нагружения и деформирования.

6.2.5. Допустимая погрешность результатов испытания на стадии проектирования больше, чем для готовой детали. Отклонения на 10 % по уровню напряжений в блоке нагружения приводят к изменению долговечности в 1,5—2,0 раза.

6.3. Испытания на усталость осуществляют по программе испытаний. Условия и результаты фиксируют в протоколе испытаний по ГОСТ 25.502—79.

6.3.1. Для оценки чувствительности к ассимметрии нагружения необходимо проводить испытание на усталость, как минимум, при двух значительно отличающихся друг от друга значениях коэффициента асимметрии (например при $R = -1$ и $R = 0$).

6.3.2. Для определения наклона кривой усталости или распознавания возможного пересечения различных кривых усталости уровни напряжения выбирают таким образом, чтобы дости-

галось существенное различие по усталостному ресурсу (примерно от 5×10^4 до 10^6 по кривой усталости).

6.3.3. Базу испытаний назначают в зависимости от задачи исследования по ГОСТ 25.502—79.

6.3.4. Эффективный объем выборки необходимо увеличивать использованием свойств симметрии деталей (например, оценку усталостных характеристик проводить на многих симметрично расположенных и идентично нагруженных сечениях).

6.3.5. Для сложных деталей после появления первых разрушений допускается проводить ремонт отдельных сечений с тем, чтобы продолжать испытания и устанавливать другие слабые места конструкции или проверять эффективность способа ремонта.

6.3.6. При выборе вида нагружения следует учитывать, что он не влияет на величину предела выносливости, но общая долговечность, особенно период живучести, увеличивается с переходом от мягкого (с заданным размахом нагрузки) к жесткому (с заданным размахом деформации) нагружению.

6.3.7. При выборе длины плеча изгибающего момента при консольном изгибе учитывают, что на сопротивление усталости оказывает влияние сочетание нормальных и касательных напряжений. С уменьшением плеча и соответственно увеличением поперечной силы предел выносливости снижается. Поэтому в качестве одного из критериев сопоставимости схемы нагружения рекомендуется принимать постоянство отношения нормальных напряжений к касательным.

6.3.8. Испытуемую деталь крепят в машине таким образом, чтобы были обеспечены требования техники безопасности и не возникали при этом дополнительные напряжения, не предусмотренные программой испытаний. При испытании на растяжение—сжатие напряжения от дополнительного изгиба не должны превышать 10 % напряжений растяжения-сжатия. Центровка деталей должна исключать возникновение дополнительных вибраций машины.

6.3.9. Все детали испытывают на однотипных машинах с идентичными метрологическими характеристиками при одинаковом виде нагружения.

6.3.10. Испытания проводят непрерывно вплоть до достижения предельного состояния деталей.

6.3.11. Заданная максимальная нагрузка цикла нагружения не должна быть превышена, так как это может привести к изменению исходной прочности детали и сильному рассеянию результатов испытаний. Нагружение в процессе достижения заданной амплитуды и частоты циклов осуществляют плавно.

6.3.12. Постоянство уровня задаваемых нагрузок или деформаций периодически или непрерывно контролируют в зависимости от стабильности работы машины и ее оснащенности регистрирующей аппаратурой.

6.3.13. При проведении сравнительных испытаний на усталость необходимо гарантировать идентичность условий эксперимента и параметров нагрузки.

7. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

7.1. Представление результатов испытаний

7.1.1. При достаточном количестве результатов испытаний они представляются как кривая усталости или как функция долговечности при случайном нагружении, а также как диаграмма предела выносливости, предела ограниченной выносливости или эксплуатационной прочности соответственно для определенной вероятности безотказной работы или вероятности разрушения.

7.1.2. Кривая усталости изображается для определенных значений среднего напряжения или коэффициента асимметрии цикла напряжений в линейной, двойной или полулогарифмической системе координат применительно к максимальному напряжению или амплитуде напряжений.

Примечание. Кривая усталости становится более пологой при:
снижении остроты надреза;
увеличении среднего напряжения;
уменьшении вероятности безотказной работы.

Абсцисса точки перелома кривой усталости соответствует числам циклов до разрушения от 2×10^6 до 10^7. Для цветных металлов, а также при повышенной температуре, коррозии или коррозии трения она может быть достигнута при большем числе циклов или может вообще отсутствовать.

7.1.3. Кривые усталости строят в линейных, полулогарифмических или двойных логарифмических координатах по:

напряжениям: $\sigma—N$; $\sigma—\lg N$; $\lg \sigma—\lg N$;
нагрузкам: $P—N$; $P—\lg N$; $\lg P—\lg N$;
деформациям: $\varepsilon—N$; $\varepsilon—\lg N$; $\lg \varepsilon—\lg N$.

7.1.4. При асимметричных циклах кривые усталости строят для серии одинаковых деталей с постоянными коэффициентами асимметрии цикла, средними, минимальными или максимальными напряжениями (деформациями).

7.1.5. Левую ветвь кривой усталости при эксплуатационном нагружении изображают в виде прямой, как и для кривой усталости при регулярном нагружении. Ее наклон при случайном испытании почти совпадает с кривой усталости при регулярном нагружении. При блок-программном испытании она более пологая. В нижней части кривая долговечности по сравнению с верхней частью имеет более пологий наклон. Результаты представляют в максимальных значениях последовательности экстремумов или блок-программы.

Сравнение результатов, которые получают при последовательностях экстремумов или блок-программах с различными по величине максимальными значениями, осуществляют на основе среднеквадратического отклонения нагрузок процесса нагружения или определенного кратного от него.

В качестве меры долговечности при случайном испытании действительно число восходящих (нисходящих) прохождений через нуль или число циклов. Можно использовать оба метода.

7.1.6. Диаграмма предела выносливости или предела ограниченной выносливости имеет форму диаграммы предельных напряжений или амплитуд, в которых линии максимальных напряжений и амплитуды напряжений цикла приняты прямыми. Линия максимальных напряжений в диаграмме предельных напряжений становится более пологой при:

уменьшающемся числе циклов до разрушения;

уменьшающейся остроте надреза;

уменьшающейся вероятности безотказной работы.

Диаграмма эксплуатационной прочности для последовательности экстремумов или блок-программы составляется таким же образом.

7.1.7. Диаграммы предельных напряжений (амплитуд) строят с помощью кривых усталости, полученных по результатам испытаний не менее трех партий одинаковых деталей при разных для каждой партии средних напряжениях или коэффициентах асимметрии цикла.

7.1.8. Для аппроксимации кривой усталости используют двухпараметрическое уравнение

$$\sigma_a^m \cdot N = \text{const}. \qquad (4)$$

7.2. Оценка результатов испытаний

7.2.1. После испытаний оценивают соответствие качества изготовленных деталей требованиям нормативно-технической документации, а также расположения и вида разрушения, заданным программой и условиями испытаний.

7.2.2. При получении резко выделяющихся результатов следует устанавливать соответствие условий нагружения и вида разрушения испытуемой детали требованиям нормативно-технической документации.

7.2.3. При большом объеме выборки оценку осуществляют статистически.

7.2.4. Предпосылкой возможности оценки при малом объеме выборки являются данные о дисперсии результатов испытаний для подобных случаев. Если испытывают только одну деталь, то в целях повышения надежности следует предположить, что полученная долговечность соответствует малой вероятности безотказной работы ($P' \approx 10$ %). Рассеяние долговечности одинаковых несварных деталей допускается оценивать значением условной меры рассеяния T_N по формуле

$$T_N = N_{P'=90\ \%}/N_{P'=10\ \%} \text{ (обычно } T_N \text{ от 1:2 до 1 : 3).} \qquad (5)$$

Большее значение справедливо для меньшего уровня напряжения. Рассеяние удваивают, если учитывают другие влияния (различные плавки, необработанные поверхности, нестабильность технологии изготовления). Характеристики рассеяния и их соотношения приведены в приложении 4.

7.2.5. Различные конструктивные и технологические варианты детали могут привести к пересечению кривых усталости и долговечности. Поэтому из различий пределов ограниченной выносливости нельзя сделать вывод о различиях в пределе выносливости.

Рассеяние искомых значений прочности деталей состоит из рассеяния результатов усталостного испытания и рассеяния нагружения вследствие погрешности испытательного устройства.

7.2.6. Экспериментальный метод оценки долговечности при вероятности безотказной работы $P' \approx 90$ % практически применим, если ошибка по долговечности составляет не более 100 % в безопасную сторону, а по напряжениям — не более 20 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Обязательное

ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В НАСТОЯЩЕМ СТАНДАРТЕ

A_1 — одноступенчатое испытание;
B — блок-программное испытание;
C — случайное испытание с цифровым моделированием последовательности экстремумов;
$Д$ — случайное испытание со слежением;
E — схематизация по методу экстремумов;
R — схематизация по методу «падающего дождя»;
A — схематизация по методу амплитуд;
σ_{max} — максимальное напряжение цикла — по ГОСТ 23207—78;
σ_{min} — минимальное напряжение цикла — по ГОСТ 23207—78;
σ_a — амплитуда напряжений цикла — по ГОСТ 23207—78;
σ_m — среднее напряжение спектра;
$\tilde{H}(\sigma_{max})$ — функция частоты максимумов;
$\tilde{H}(\sigma_{min})$ — функция частоты минимумов;
N_s — объем спектра;
$\hat{\sigma}_{max}$ — абсолютный максимум спектра;
$\hat{\sigma}_{min}$ — абсолютный минимум спектра;
$\hat{\sigma}_a$ — максимальная амплитуда спектра;
h_i — число циклов в i-й ступени блока нагружения;
i — номер ступени блока;
$\overline{H}_i$ — накопленная частота для i-й ступени блока нагружения;
V — мера полноты спектра;
$v_б$ — объем блока (общее число циклов в блоке нагружения);
i_s — возрастающая ступень;
i_f — ниспадающая ступень;
k — число ступеней;
p — коэффициент гасснеровского спектра нагружения;
χ — коэффициент нерегулярности — по ГОСТ 25.101—83;
$\sigma_{-1д}$ — предел выносливости детали при симметричном цикле — по ГОСТ 25.504—82;
σ_{SG} — величина повреждающих амплитуд при случайном нагружении;
S_σ — среднеквадратическое отклонение нагрузок процесса нагружения;
m — показатель наклона левой ветви кривой усталости — по ГОСТ 25.504—82;
n — текущее число циклов нагружения — по ГОСТ 23207—78;
N — циклическая долговечность — по ГОСТ 23207—78;
σ_{ai} — амплитуда нагружения на i-й ступени;
ΔD_i — доля повреждений для i-й ступени внутри одного блока;
n_0 — число пересечений процессом уровня средней нагрузки;
N_s^+ — число положительных максимумов в спектре;
R_σ — коэффициент асимметрии цикла напряжений — по ГОСТ 23207—78;
P' — вероятность безотказной работы;
$N_{P'}$ — долговечность, соответствующая вероятности безотказной работы P';
T_N — условная мера рассеяния долговечности деталей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Рекомендуемое

МЕТОДИКА И ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ИСПЫТУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО РЕСУРСА

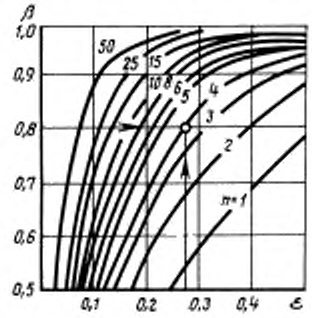
1. Число деталей для оценки среднего ресурса (при стационарном и нестационарном нагружениях) при завершенных испытаниях и неизвестном коэффициенте вариации ресурсов зависит от принятого значения доверительной вероятности β и относительной погрешности оценки среднего ресурса ε в предположении логарифмически нормального закона распределения ресурсов. Ресурс N детали может быть измерен числом циклов до разрушения, продолжительностью эксплуатации или испытания, длиной пробега и т. п.

2. В зависимости от цели испытания, вида и стоимости деталей, объема их выпуска и последствий отказа могут быть установлены следующие три группы точности оценки среднего ресурса, характеризуемые относительной погрешностью: высокая ($0{,}1 \le \varepsilon \le 0{,}2$), средняя ($0{,}2 \le \varepsilon \le 0{,}3$) и низкая ($0{,}3 \le \varepsilon \le 0{,}4$).

3. Для большинства случаев уровень $\beta = 0{,}8$, а для деталей, влияющих на безопасность эксплуатации, — не менее 0,9.

4. Минимально необходимое число деталей n определяют по номограмме (см. чертеж) на пересечении горизонтали и вертикали, соответствующих принятым значениям β и ε. Дробное число округляют до целого в сторону увеличения.

Номограмма для определения минимального необходимого числа деталей для испытания



5. В результате испытаний n выбранных деталей получают значения ресурсов $N_1, N_2, \ldots, N_n$.

Оценку среднего ресурса вычисляют по формуле

$$\overline{N} = \sum_{i=1}^{n} N_i / n. \qquad (1)$$

6. Действительная величина среднего ресурса $N_{ср}$ с доверительной вероятностью β и относительной погрешностью ε находится в интервале

$$(1 - \varepsilon) \cdot \overline{N} \le N_{ср} \le (1 + \varepsilon) \cdot \overline{N}. \qquad (2)$$

7. Примеры определения минимального числа испытуемых деталей для оценки среднего ресурса

Пример 1. При относительной погрешности $\varepsilon = 0{,}275$ (27,5 %) в соответствии с номограммой для значения $\beta = 0{,}8$ получим число деталей для оценки среднего ресурса $n = 4$.

Пример 2. При испытании четырех пружин подвески определены следующие значения ресурса: 1015, 6580, 3343, 5286 ч.

По формуле (1) средний ресурс $\overline{N} = 4056$ ч.

Истинное значение среднего ресурса $N_{ср}$ по формуле (2) с доверительной вероятностью $\beta = 0{,}8$ находится в интервале $4056\ (1 - 0{,}275) \le N_{ср} \le 4056\ (1 + 0{,}275)$ или $2940 \le N_{ср} \le 5270$ ч.

Повышение точности оценки среднего ресурса возможно путем уменьшения относительной погрешности, например до $\varepsilon = 0{,}15$, что требует, в соответствии с номограммой, испытания 14 пружин.

С учетом уже испытанных четырех пружин получаем следующие значения ресурса: 2840, 1035, 7650, 5270, 3785, 9628, 4577, 3685, 6423 и 5584 ч.

Средний ресурс $\overline{N}$ составляет 4764 ч.

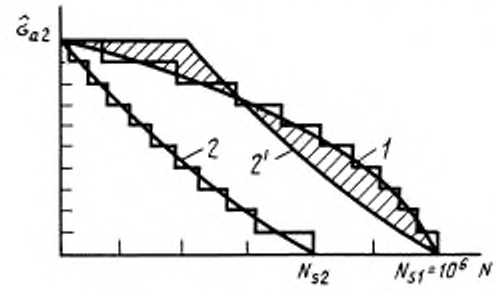
Истинное значение среднего ресурса $N_{ср}$ с вероятностью $\beta = 0{,}8$ при $\varepsilon = 0{,}15$ находится в интервале $4050 \le N_{ср} \le 5480$ ч.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Справочное

МЕТОДИКА ПЕРЕСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПО ЛИНЕЙНОЙ ГИПОТЕЗЕ СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Задана полученная экспериментальным путем долговечность для стандартного спектра нагружения определенной формы (спектр 1 — см. чертеж).

Требуется пересчитать долговечность для спектра нагружения подобной формы (спектр 2 — см. чертеж).



1 — спектр *1*; *2* — спектр *2*; *2'* — спектр *2*, расширенный до объема спектра $N_{s1} = 10^6$, ▨ — отличие форм обоих спектров

Относительное правило линейного суммирования повреждений описывают выражением

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{\left(\Sigma \frac{n}{N}\right)_1}{\left(\Sigma \frac{n}{N}\right)_2},$$

где N_2 — искомая долговечность для спектра 2 с абсолютным максимумом $\hat{\sigma}_{a2}$ и объемом спектра N_{s2};

N_1 — заданная долговечность для спектра 1 с абсолютным максимумом $\hat{\sigma}_{a1} = \hat{\sigma}_{a2}$ и объемом спектра $N_{s1} = 10^6$;

$\left(\Sigma \frac{n}{N}\right)_1$ — сумма относительных долговечностей для спектра 1;

$\left(\Sigma \frac{n}{N}\right)_2$ — сумма относительных долговечностей для спектра 2.

Суммы относительных долговечностей рассчитывают по линейной гипотезе суммирования повреждений с учетом известных кривой усталости и диаграммы предельных напряжений. Вероятность безотказной работы при долговечности N_2 соответствует той же вероятности при долговечности N_1.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4
Справочное

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНИЯ ПРИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ С ЛОГАРИФМИЧЕСКИ НОРМАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Между различными характеристиками рассеяния долговечности действительны для небольших $\sigma_{\lg N}$, $\sigma_{\ln N}$, v_N и для T_N, близких к единице, следующие соотношения:

$$\sigma_{\lg N} = \frac{1}{\ln 10} \cdot \sigma_{\ln N} = 0{,}43\sigma_{\ln N}; \tag{1}$$

$$\sigma_{\lg N} = -\frac{1}{2z_p} \lg T_N = -0{,}391 \lg T_N; \tag{2}$$

$$\sigma_{\ln N} = -\frac{1}{2z_p} \ln T_N = -0{,}39 \ln T_N; \tag{3}$$

$$T_N = 10^{-2z_p\sigma_{\lg N}} = 10^{-2{,}56\,\sigma_{\lg N}}; \tag{4}$$

$$T_N = e^{-2z_p\sigma_{\ln N}} = e^{-2{,}56\,\sigma_{\ln N}}; \tag{5}$$

$$\sigma_{\lg N} = \sqrt{\frac{1}{\ln 10} \lg (1 + v_N^2)} = 0{,}66 \sqrt{\lg (1 + v_N^2)} \approx \frac{1}{\ln 10} v_N = 0{,}43 v_N; \tag{6}$$

$$\sigma_{\ln N} = \sqrt{\ln (1 + v_N^2)} \approx v_N; \tag{7}$$

$$v_N = \sqrt{10^{\ln 10 \cdot \sigma_{\ln N}^2} - 1} = \sqrt{10^{2{,}30\,\sigma_{\ln N}^2} - 1} \approx \ln 10 \sigma_{\lg N} = 2{,}30 \cdot \sigma_{\lg N}; \tag{8}$$

$$v_N = \sqrt{e^{\sigma_{\ln N}^2} - 1} \approx \sigma_{\ln N}; \tag{9}$$

$$T_N = 10^{-2z_p\sqrt{\frac{1}{\ln 10} \lg (1 + v_N^2)}} = 10^{-1{,}11\sqrt{\lg (1 + v_N^2)}} \approx$$

$$\approx 10^{-\frac{2z_p}{\sqrt{\ln 10}} v_N} = 10^{-1{,}11 v_N}; \tag{10}$$

$$T_N = e^{-2z_p\sqrt{\ln (1 + v_N^2)}} = e^{2{,}56\sqrt{\ln (1 + v_N^2)}} \approx e^{-2z_p v_N} = e^{-2{,}56 v_N}; \tag{11}$$

$$v_N = \sqrt{T_N^{\frac{\ln 10}{4z_p^2} \lg T_N}} - 1 = \sqrt{T_N^{0{,}35 \lg T_N}} - 1 \approx -\frac{\ln 10}{2z_p} \cdot \lg T_N = -0{,}90 \lg T_N; \tag{12}$$

$$v_N = \sqrt{T_N^{\frac{1}{4z_p^2} \ln T_N}} - 1 = \sqrt{T_N^{0{,}15 \ln T_N}} - 1 \approx -\frac{1}{2z_p} \cdot \ln T_N = -0{,}39 \ln T_N, \tag{13}$$

где $v_N = \sigma_N / \mu_N$ — коэффициент вариации долговечности; μ_N, σ_N — среднее значение и генеральное среднеквадратическое отклонение долговечности; $\sigma_{\lg N}^2$, $\sigma_{\ln N}^2$ — дисперсия логарифмов долговечности; $z_p = 1{,}28$ — односторонняя 90 %-ная квантиль нормального распределения.

По напряжениям σ в области пределов ограниченной выносливости действительны соотношения (m — показатель наклона левой ветви кривой усталости в двойных логарифмических координатах или кривой долговечности на рассматриваемом уровне нагружения), рассчитанные по формулам:

$$\sigma_{\lg\sigma} = \frac{1}{m} \cdot \sigma_{\lg N}; \tag{14}$$

$$T_\sigma = T_N^{1/m}; \tag{15}$$

$$v_\sigma = \frac{1}{m} v_N. \tag{16}$$

Если распределение предела выносливости принимают нормальным, то между характеристиками рассеяния по напряжениям действительны соотношения, рассчитанные по формулам:

$$T_\sigma = \frac{\mu_\sigma - z_P \cdot \sigma_\sigma}{\mu_\sigma + z_P \cdot \sigma_\sigma} = \frac{1 - z_P \cdot v_\sigma}{1 + z_P \cdot v_\sigma} = \frac{1 - 1{,}28 v_\sigma}{1 + 1{,}28 v_\sigma}; \quad (17)$$

$$v_\sigma = \frac{1}{z_P} \cdot \frac{1 - T_\sigma}{1 + T_\sigma} = 0{,}78 \frac{1 - T_\sigma}{1 + T_\sigma} \approx -0{,}39 \ln T_\sigma, \quad (18)$$

где μ_σ, σ_σ — среднее значение и генеральное среднеквадратическое отклонение предела выносливости; $T_\sigma = \sigma_{P=90\,\%} / \sigma_{P=10\,\%}$ — условная мера рассеяния по напряжениям; $v_\sigma = \sigma_\sigma / \mu_\sigma$ — коэффициент вариации напряжений.

Пример. При среднем показателе наклона кривой усталости $m = 5$ для несварных деталей могут иметь место следующие числовые значения характеристик:

$T_N = 0{,}15 \approx 1 : 6$, $T_\sigma = 0{,}7 \approx 1 : 1{,}5$;

$\sigma_{\lg N} = 0{,}3$, $\sigma_{\lg\sigma} = 0{,}06$;

$\sigma_{\ln N} = 0{,}7$, $\sigma_{\ln\sigma} = 0{,}14$;

$v_N = 0{,}8$, $v_\sigma = 0{,}16$.

gost.e-ecolog.ru