МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ

МЕТОДЫ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

РД 50—686—89

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО УПРАВЛЕНИЮ
КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ И СТАНДАРТАМ
Москва
1990

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.002.6—192 : 006.354 Группа В09

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Надежность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций

РД 50—686—89

ОКСТУ 0004

Дата введения 01.01.90

Настоящие методические указания распространяются на образцы и детали машин из металлических материалов, кривая усталости которых имеет горизонтальный участок, и устанавливают методы ускоренных испытаний для определения предела выносливости.

Методические указания не распространяются на методы ускоренных испытаний для определения предела ограниченной выносливости и характеристик эксплуатационной прочности.

Термины, применяемые в настоящих методических указаниях, — по ГОСТ 23207.

Обозначения и определения величин, применяемых в настоящих методических указаниях, приведены в приложении 1.

Примеры применения различных методов ускоренных испытаний приведены в приложении 2.

Настоящие методические указания унифицированы со стандартом ГДР ТГЛ 19338.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. При планировании испытаний обеспечивают:

случайный отбор объектов испытаний из генеральной совокупности;

исследование всех влияний на результаты испытаний;

исключение нежелательных воздействий.

1.2. Устанавливают возможности ограничения объема испытаний с последующим уточнением (при необходимости) постановки вопроса.

★

© Издательство стандартов, 1990

1.3. При обработке результатов испытаний принимают во внимание все опытные данные, которые могут быть использованы в дальнейшем (например для оценки вида функции распределения).

1.4. Критерий отказа должен быть установлен перед испытаниями. В качестве критериев отказов принимают:

полное разрушение;

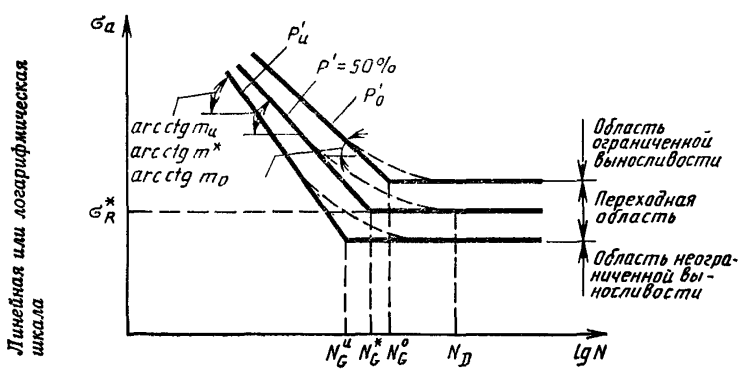
возникновение трещины;

достижение трещиной определенной длины;

недопустимые изменения формы или другие критерии.

1.5. Предел выносливости σ_R определяют на базе испытаний N_D (что соответствует также абсциссе точки перелома кривой усталости N_G при ее аппроксимации (черт. 1) двумя отрезками прямых в двойных логарифмических или полулогарифмических координатах).

Схематическое представление кривых усталости в двойных логарифмических и полулогарифмических координатах



Черт. 1

1.6. Предел выносливости — случайная величина, которая находится в переходной области кривой усталости.

Переходная область — зона, в которой при испытании до базового числа циклов либо происходит отказ, либо не происходит. От вероятности наступления одного из этих двух событий зависит распределение предела выносливости (п. 3.2).

Вероятность того, что при напряжении σ_a произойдет отказ, равна вероятности того, что предел выносливости меньше, чем σ_a.

1.7. При ускоренных испытаниях по пп. 2.1—2.3 возможно определение только медианы выносливости.

Метод Про (п. 3.1) позволяет дополнительно оценить рассеяние предела выносливости.

Значения предела выносливости для высокой вероятности безотказной работы могут быть определены методом ограничения Мэннига (п. 3.2).

1.8. Границы переходной области соответствуют вероятности безотказной работы $P'_и$ (нижняя граница) и P'_0 (верхняя граница). Для $P'_и = 90\%$ принимают $P'_0 = 10\%$ или (для большей статистической надежности) $P'_и = 95\%$ и $P'_0 = 5\%$.

1.9. В большинстве случаев (при отсутствии специальных указаний относительно вида распределения) целесообразно принимать распределение пределов выносливости нормальным.

2. МЕТОДЫ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ

2.1. Определение предела выносливости экстраполяцией левой ветви кривой усталости

Метод основан на принятой линеаризации левой ветви кривой усталости в полулогарифмических или двойных логарифмических координатах и предназначен для определения значения предела выносливости.

Предпосылкой метода является то, что левая ветвь кривой усталости известна, или может быть получена из предварительных экспериментов по ГОСТ 25.502.

Предел выносливости вычисляют графически или аналитически экстраполяцией левой ветви до базового числа циклов (N_D), при этом получают значение около 0,9 σ_R, или до абсциссы точки перелома кривой усталости (N_G). Значение N_D составляет для черных металлов и сплавов 10^7 циклов, а N^*_G при отсутствии экспериментальных данных принимают по табл. 1.

Таблица 1

Ориентировочные значения абсциссы точки перелома кривых усталости для объектов испытаний из стали

Объект испытания	N^*_G	Примечание
Образцы материала	$2 \cdot 10^6$	—
Несварные детали машин	$1 \cdot 10^6$—$5 \cdot 10^6$	В зависимости от уровня концентрации напряжений
Сварные соединения	$2 \cdot 10^6 \ldots 10^7$	
Цилиндрические зубчатые передачи	$3 \cdot 10^6$	По критерию усталостной прочности ножки зуба

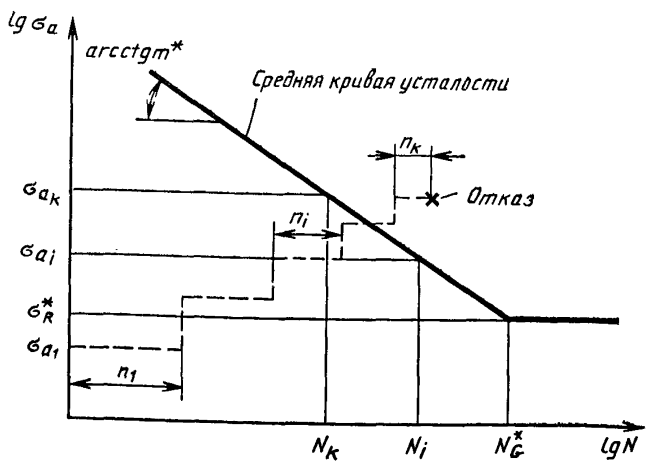
Когда имеются экспериментальные данные в переходной области, то можно параметр σ_R рассматривать как медиану предела выносливости, если при испытании как минимум трех образцов в области (0,95—1,05) σ_R примерно половина достигла числа циклов N_G^*.

2.2. Определение предела выносливости методом Локати

2.2.1. Метод основан на известной гипотезе линейного суммирования повреждений и предназначен для ускоренного определения среднего значения предела выносливости.

2.2.2. Предпосылкой метода является то, что левая ветвь кривой усталости определена в вероятностном аспекте для изделий-аналогов или одной из предшествующих партий исследуемых объектов. В этом случае необходимо испытание как минимум одного изделия (образца). Испытание проводят при ступенчато-возрастающей нагрузке до разрушения образца (черт. 2).

Испытания по методу Локати



Черт. 2

2.2.3. Путем экстраполяции до N_G^* (см. п. 2.1) или из опыта получают оценку среднего значения ожидаемого предела выносливости σ_R^*, при этом

$$\sigma_{a_1} = (0{,}9—1{,}0)\ \sigma_R^* . \qquad (1)$$

Приращение напряжений $\Delta\sigma_{a_i}=\sigma_{a_{i+1}}-\sigma_{a_i}$ выдерживают постоянным и определяют по уравнению (2)

$$\Delta\sigma_a=0{,}1\,\sigma_{a_1}. \qquad (2)$$

Число циклов n_1, где $i=1,\ldots,k-1$ (k — номер ступени, на которой происходит разрушение), также принимают постоянным и вычисляют по уравнению (3)

$$n_1=\begin{cases}7500\,\Delta\sigma_a \text{ — для } \sigma_{a_1}=0{,}9\,\sigma^*_R\\ 6700\,\Delta\sigma_a \text{ — для } \sigma_{a_1}=\sigma^*_R\end{cases} \qquad (\Delta\sigma_a \text{ — в МПа}). \qquad (3)$$

2.2.4. Для оценки $\hat{\sigma}_{R;\,0,5}$ левая ветвь кривой усталости должна быть представлена статистически, т. е. наряду с m^* и N^*_G должны быть известны $m_и$, m_0, $N^и_G$, N^0_G, $\sigma^и_R$, σ^0_R.

Приближенно для $P'_и=90\%$ и $P'_0=10\%$

$$N^и_G=2/3\,N^*_G, \qquad (4)$$

$$N^0_G=1{,}5N^*_G. \qquad (5)$$

Приближенно значения $\sigma^и_R$ и σ^0_R могут быть получены с использованием меры рассеяния $T_{\sigma_R}=\sigma^и_R/\sigma^0_R$ по формулам:

$$\sigma^и_R=\sigma^*_R\,\frac{2T_{\sigma_R}}{1+T_{\sigma_R}}, \qquad (6)$$

$$\sigma^c_R=\sigma^*_R\,\frac{2}{1+T_{\sigma_R}}. \qquad (7)$$

Далее по уравнению (8) вычисляют три суммы накопленных повреждений

$$\left(\Sigma\frac{n_i}{N_i}\right)^и,\left(\Sigma\frac{n_i}{N_i}\right)^*,\left(\Sigma\frac{n_i}{N_i}\right)^0.$$

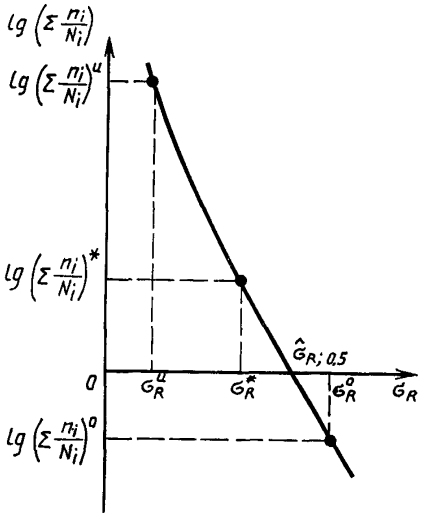
$$\left(\Sigma\frac{n_i}{N_i}\right)^x=\sum_{i=1}^{k}\frac{n_i}{N^x_i}\ (x=и,\,*,\,0), \qquad (8)$$

где

$$N^x_i=\begin{cases}N^x_G\left(\dfrac{\sigma^x_R}{\sigma_{a_i}}\right)^{m^x}=N^x_G\left[\dfrac{\sigma^x_R}{\sigma_{a_1}+(i-1)\Delta\sigma_a}\right]^{m^x}, & \sigma_{a_i}\geqslant\sigma^x_R\\ \infty & \sigma_{a_1}<\sigma^x_R\end{cases} \qquad (9)$$

2.2.5. Оценку медианы предела выносливости $(\hat{\sigma}_{R;0,5})$ определяют графически или аналитически экстраполяцией или интерполяцией графика, представленного на черт. 3.

Определение $\hat{\sigma}_{R;\,0,5}$ по имеющимся вероятностным кривым усталости



Черт. 3

При повторном проведении опытов методом Локати можно определить дополнительные оценки $\hat{\sigma}_{R;0,5}$ и затем усреднить их.

2.3. Определение предела выносливости по методу Субраманьяна

2.3.1. Метод основан на предпосылке о пересечении линий повреждения в одной точке, которая одновременно является точкой перелома кривой усталости образцов материалов.

2.3.2. Для использования метода необходимо знать координаты двух точек на левой ветви кривой усталости (σ_{a_1}, N_1) и (σ_{a_2}, N_2), причем $\sigma_{a_1} > \sigma_{a_2} > \sigma_R$.

Если таких данных нет, то проводят испытания двух групп образцов на уровнях напряжения σ_{a_1} и σ_{a_2} (не менее трех образцов на каждом из уровней) и получают соответствующие значения усталостной долговечности $\overline{N}_1$ и $\overline{N}_2$.

Проводят двухступенчатые испытания не менее трех идентичных образцов сначала в течение n_1 циклов на уровне напряжения σ_{a_1} и затем доводят образцы до разрушения на уровне напряжения σ_{a_2} и получают среднее значение остаточного ресурса $\bar{n}_2$.

Предел выносливости определяют по уравнению

$$\hat{\sigma}_{R;0,5} = \frac{\sigma_{a_2} - q\sigma_{a_1}}{1-q}, \qquad (10)$$

где $q = \ln(1 - \frac{\bar{n}_2}{\bar{N}_2}) / \ln(\frac{n_1}{\bar{N}_1})$. (11)

При этом целесообразно соблюдать условия:

1. $0{,}1 < \frac{n_1}{\bar{N}_1}; \frac{\bar{n}_2}{\bar{N}_2} < 1;$ (12)

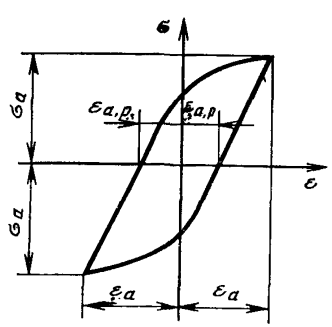
2. $\sigma_{a_1} - \sigma_{a_2} > 0{,}3\sigma_R^*$; (13)

3. $N_1 \geqslant 5 \cdot 10^4$. (14)

2.4. Определение предела выносливости при помощи метода ступенчато повышаемых деформаций (Dst — метод)

2.4.1. Метод основан на соотношении циклических напряжений и деформаций материала в области многоцикловой усталости и предназначен для определения 10%-го квантильного значения предела выносливости при растяжении-сжатии. Используемые величины напряжений-деформаций пояснены на черт. 4 при помощи диаграммы циклического деформирования (петли гистерезиса).

Параметры диаграммы циклического деформирования



Черт. 4

Из условия $\varepsilon_{a,p} \to 0$ получают характеристическое значение амплитуды переменных напряжений для материала, которое определяется как циклический предел упругости $\sigma^E_{цикл}$.

Эта величина, которая не зависит от влияния поверхности, поперечного сечения или масштабного фактора, соответствует также пределу выносливости при растяжении-сжатии для вероятности разрушения 10%.

При проведении испытаний с управлением по деформациям можно заменить условие $\varepsilon_{a,p} \to 0$ условием $\Delta\sigma_a \to 0$. Падение напряжений $\Delta\sigma_a$ характеризует падение амплитуды напряжений вследствие разупрочнения материала. Значение $\sigma^{E}_{\text{цикл}}$ получается при этом непосредственно из простого измерения усилия.

2.4.2. Предпосылками реализации метода являются наличие:

управляемой от ЭВМ сервогидравлической испытательной машины;

устройств для измерения сил и деформаций (например экстензометров).

Метод применим для:

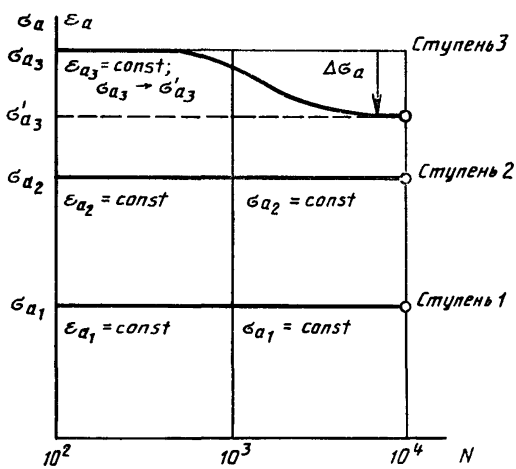
нелегированных или низколегированных углеродистых сталей;

ненадрезанных (гладких) образцов;

незначительного числа образцов ($n \geqslant 5$).

2.4.3. Испытания начинают согласно черт. 5 с уровня нагружения ниже предела выносливости при растяжении-сжатии $\sigma^{(p)}_{-1}$, т. е. выбирают

Предварительные испытания с управлением по деформациям для определения начала разупрочнения



Черт. 5

$$\varepsilon_{a_1} < \frac{\sigma_{-1}^{(p)}}{E}. \qquad (15)$$

Для конструкционных сталей действительно соотношение

$$\sigma_{-1}^{(p)} \approx 0{,}45\ \sigma_B. \qquad (16)$$

2.4.4. Если на уровне ε_{a_1} до накопления числа циклов $N=10^4$ не установлено падение σ_a, то амплитуду деформаций ε_a повышают на $0{,}1\cdot10^{-3}$ и проводят испытания такого же образца на уровне деформаций ε_{a_2} до накопления 10^4 циклов.

Испытания продолжают таким образом до тех пор, пока не будет зафиксировано (доказано) падение напряжений $\Delta\sigma_a$ (например $\sigma_{a_2} \to \sigma'_{a_3}$ на черт. 5).

Значение $\sigma_{a_3} - \Delta\sigma_a = \sigma'_{a_3}$ дает уже хорошее приближение для $\sigma_{\text{цикл}}^E$.

2.4.5. Дальнейшие испытания проводят как двухступенчатые опыты на следующих уровнях деформаций:

1-я ступень

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_{a_1}}{E} - 0{,}05\cdot10^{-3}; \qquad N=2{,}5\cdot10^4,$$

2-я ступень

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_{a_1}}{E} + 0{,}05\cdot10^{-3}; \qquad N=2{,}5\cdot10^4.$$

Значение σ'_{a_1} соответствует амплитуде напряжений, при которой в предварительных испытаниях наблюдалось разупрочнение материала (например σ'_{a_3} на черт. 5).

В качестве $\sigma_{\text{цикл}}^E$ и соответственно $\sigma_{-1}^{(p)}$ принимают то значение, которое получается вследствие разупрочнения на 1-й ступени или (в случае, если на 1-й ступени еще не наблюдалось разупрочнение) — на 2-й ступени.

Проводить испытания целесообразно при частоте нагружения 0,5—1,0 Гц.

3. МЕТОДЫ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ

3.1. Метод прогрессивного повышения нагрузки для определения медианы и среднего квадратического отклонения предела выносливости (метод Про)

3.1.1. Метод основан на принятой зависимости между σ_R и разрушающим напряжением σ_p в экспериментах с прогрессивно возрастающей нагрузкой, имеющей вид

$$\sigma_p = \sigma_R + K \cdot \alpha^c, \tag{17}$$

где K и c — постоянные, а α — средняя скорость возрастания напряжений ($\Delta\sigma_a/\Delta n$).

3.1.2. Начиная с начального напряжения σ_{a_0}, испытуемый объект подвергают непрерывно или ступенчато возрастающей нагрузке, которая приводит в конечном итоге к разрушению при напряжении σ_p.

Значение начального напряжения σ_{a_0} должно быть меньше ожидаемого предела выносливости, и его уровень рекомендуется выбирать в пределах (0,8—0,9) σ_R^*, а значение α — в интервале от $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ МПа/цикл.

3.1.3. Испытания проводят для $l=2$—4 различных скоростей роста напряжений α_i по m_i испытуемых объектов на каждой скорости α_i. Целесообразно придерживаться следующих рекомендаций: $\alpha_1 = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ МПа/цикл, $\alpha_l \approx 3{,}5 \cdot 10^{-4}$ МПа/цикл.

Для повышения точности статистической обработки результатов испытаний наибольшее число образцов должно быть испытано при минимальном и максимальном значениях α_i, а при промежуточных значениях α_i может быть испытано меньшее число образцов, т. е. $m_1 = m_l$, $m_2 = m_{l-1} < m_1$ (при $l>2$). Общее число образцов $n = \sum\limits_{i=1}^{l} m_i > 10$.

3.1.4. Уравнение (17) описывает линейную зависимость между σ_p и a^c так, что результаты испытаний могут обрабатываться с применением методов линейного регрессионного анализа.

3.1.5. По уравнениям (18) и (19) получают $\hat{K}$ и $\hat{\sigma}_{R;0,5}$ как оценки для K и $\sigma_{R;0,5}$. Величина $\sigma_{p_{ij}}$ является при этом напряжением разрушения для j-го опыта при скорости роста напряжений α_i, а $\bar{\sigma}_{p_i}$ — средним значением всех $\sigma_{p_{ij}}$, полученных при α_i.

$$\hat{K} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{l} (\alpha_i^c \, m_i \bar{\sigma}_{p_i}) - \overline{\alpha^c} \sum\limits_{i=1}^{l} m_i \bar{\sigma}_{p_i}}{(n-1) S_\alpha^2}, \tag{18}$$

$$\hat{\sigma}_{R;0,5} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{l} m_i \bar{\sigma}_{p_i} - \hat{K} \overline{\alpha^c}, \tag{19}$$

где

$$\overline{\alpha^c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{l} m_i \alpha_i^c \; ; \qquad (n-1) \, S_\alpha^2 = \sum_{i=1}^{l} m_i \alpha_i^{2c} - n \, (\overline{\alpha^c})^2.$$

Постоянная c лежит чаще всего в интервале между значениями 0,3 и 0,5 и может быть определена минимизацией меры отклонения экспериментальных точек от теоретической прямой Q, определяемой по формуле

$$Q=\sum_{i=1}^{l} m_i(\bar{\sigma}_{p_i}-\hat{\sigma}_{R;0,5}-\hat{K}\alpha_i^c)^2. \qquad (20)$$

В качестве первого приближения можно принять $c=0{,}3$.

3.1.6. Оценку $S^2_{\sigma_R}$ рассеяния σ_R определяют из уравнения

$$S^2_{\sigma_R}=S^2_{\sigma_p}=\frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m_i}(\sigma_{p_{ij}}-\bar{\sigma}_{p_i})^2}{n-l}. \qquad (21)$$

3.1.7. Для контроля полученного по формуле (19) значения $\hat{\sigma}_{R;0,5}$ могут быть проведены испытания при $\sigma_a=\hat{\sigma}_{R;0,5}-2S_{\sigma_R}$, которые не должны привести к разрушению.

3.2. Метод ограничения Мэннига

3.2.1. Метод предназначен для определения всей переходной области кривой усталости.

3.2.2. На первом уровне $\sigma_{a_0}\approx\hat{\sigma}_R$ испытывают один объект. В зависимости от того, наступит отказ или нет до базового числа циклов N_D, уровень напряжений понижают или повышают на величину $\Delta\sigma_a$. Этот процесс продолжают до тех пор, пока на одном из уровней напряжения σ_{a_i} не наступит альтернативное событие.

На этом уровне проводят еще n—1 эксперимент, т. е. общее число испытанных на уровне σ_{a_i} образцов составит n.

В заключение проводят n испытаний на уровне напряжения σ_{a_2}, рассчитываемом по формуле

$$\sigma_{a_2}=\sigma_{a_i}(1+d), \qquad (22)$$

где $d=\begin{cases}(1-\frac{i_1}{n})\cdot S, & i_1<\frac{n}{2}\\ -\frac{i_1}{n}\cdot S, & i_1\geqslant\frac{n}{2}.\end{cases}$

Величина S определяет ширину переходной области (в долях $\sigma_{R;0,5}$), а i_1 — частоту отказов при напряжении σ_{a_1}. Для различных объектов испытаний рекомендуемые значения S приведены в табл. 2.

При помощи i_2 (частота отказов при σ_{a_2}) можно рассчитать по формуле (23) предел выносливости $\sigma_{R;P'}$, соответствующий вероятности безотказной работы P'

Таблица 2

Рекомендуемые значения параметра s

Объект испытания			s
Образцы материалов	надрезанные		0,05—0,15
	гладкие		0,10—0,20
Детали машин	простые		0,20—0,40
	сложные	хорошо определенная форма (например ступенчатые валы)	0,30—0,40
		плохо определенная форма (например корпусные детали)	0,40—0,60

$$\sigma_{\lambda;\,P'} = \sigma_{a_1}\left[1 + d\,\frac{(u_{i_1,\,n} - u_{1-P'})}{(u_{i_1,\,n} - u_{i_2,\,n})}\right], \qquad (23)$$

где $u_{1-P'}$ — квантиль нормированного нормального распределения для вероятности отказа $P = 1 - P'$; $u_{i_1,\,n}$ и $u_{i_2,\,n}$ — позиционная квантиль. Значения $u_{1-P'}$ определяют по табл. 3, а $u_{i_1,\,n}$ и $u_{i_2,\,n}$ — по табл. 4 для нормального распределения.

Таблица 3

Квантиль $u_{P'}$ нормированного нормального распределения
($u_{1-P'} = -u_{P'}$)

P'	0,5	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999
$u_{P'}$	0	0,8416	1,2816	1,6449	1,9600	2,3263	2,5758	3,0902

Необходимо стремиться, чтобы i_1 и i_2 принимали значения 1 и $n - 1$ и не принимали значений 0 и n.

3.2.3. Если имеются результаты экспериментов в области ограниченной выносливости, то в качестве σ_{a_1} необходимо использовать наивысший уровень напряжений, на котором появляются неразрушившиеся образцы.

3.2.4. Число объектов испытаний выбирают с учетом рекомендаций:

минимальное $n = 4$;

для $n < 8$ возможно только определение $\sigma_{R;0,5}$;

если ошибка в оценке $\sigma_{R;0,5}$ должна быть меньше 2%, то $n \geqslant 15$;

если ошибка для 99%-ного значения предела выносливости (нижняя граница рассеяния) должна быть меньше 5%, то $n \geqslant 20$.

Таблица 4

Значения позиционных квантилей $u_{i,n}$

n	i	$u_{i,n}$	n	i	$u_{i,n}$	n	i	$u_{i,n}$
2	2	0,5642	13	13	1,6680	18	18	1,8200
3	3	0,8463		12	1,1641		17	1,3504
	2	0,0000		11	0,8498		16	1,0657
4	4	1,0294		10	0,6029		15	0,8481
	3	0,2970		9	0,3883		14	0,6648
5	5	1,1630		8	0,1905		13	0,5016
	4	0,4950		7	0,0000		12	0,3508
	3	0,0000					11	0,2077
			14	14	1,7034		10	0,0688
6	6	1,2672		13	1,2079			
	5	0,6418		12	0,9011	19	19	1,8445
	4	0,2015		11	0,6618		18	1,3799
7	7	1,3522		10	0,4556		17	1,0995
	6	0,7574		9	0,2673		16	0,8859
	5	0,3527		8	0,0882		15	0,7000
	4	0,0000					14	0,5477
			15	15	1,7359			
8	8	1,4236		14	1,2479		13	0,4016
	7	0,8522		13	0,9477		12	0,2637
	6	0,4728		12	0,7149		11	0,1307
	5	0,1525		11	0,5157		10	0,0000
				10	0,3353			
9	9	1,4850		9	0,1653	20	20	1,8675
	8	0,9323		8	0,0000		19	1,4076
	7	0,5720					18	1,1309
	6	0,2745	16	16	1,7660		17	0,9210
	5	0,0000		15	1,2847		16	0,7454
				14	0,9903		15	0,5903
10	10	1,5388		13	0,7632		15	0,4483
	9	1,0014		12	0,5700		13	0,3149
	8	0,6561		11	0,3962		12	0,1870
	7	0,3758		10	0,2338		11	0,0620
	6	0,1227		9	0,0773			
						22	22	1,909
11	11	1,5864	17	17	1,7939	24	24	1,946
	10	1,0619		16	1,3188	26	26	1,981
	9	0,7288		15	1,0295	28	28	2,012
	8	0,4620		14	0,9074	30	30	2,039
	7	0,2249		13	0,6195			
	6	0,0000		12	0,4513	32	32	2,066
				11	0,2952	34	34	2,091
12	12	1,6292		10	0,1460	36	36	2,114
	11	1,1157		9	0,0000	38	38	2,136
	10	0,7928				40	40	2,156
	9	0,5368						
	8	0,3122						
	7	0,1026						

$u_{1,n} = -u_{n-i+1,n}$; $u_{0,n} = u_{1,2n}$.

Оба последние требования основаны на предположении, что d, как минимум, равно половине переходной области, а i_1, i_2 — отличны от нуля и n.

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Схема выбора метода ускоренных испытаний приведена в табл. 5. В схеме перечислены некоторые из условий, необходимых для практической реализации методов.

4.2. В зависимости от того, требуется получить оценку лишь одного значения предела выносливости, соответствующего вероятности P', либо точечную оценку предела выносливости и характеристики его рассеяния при выборе метода ускоренных испытаний, переходят к п. 4.3 или 4.5.

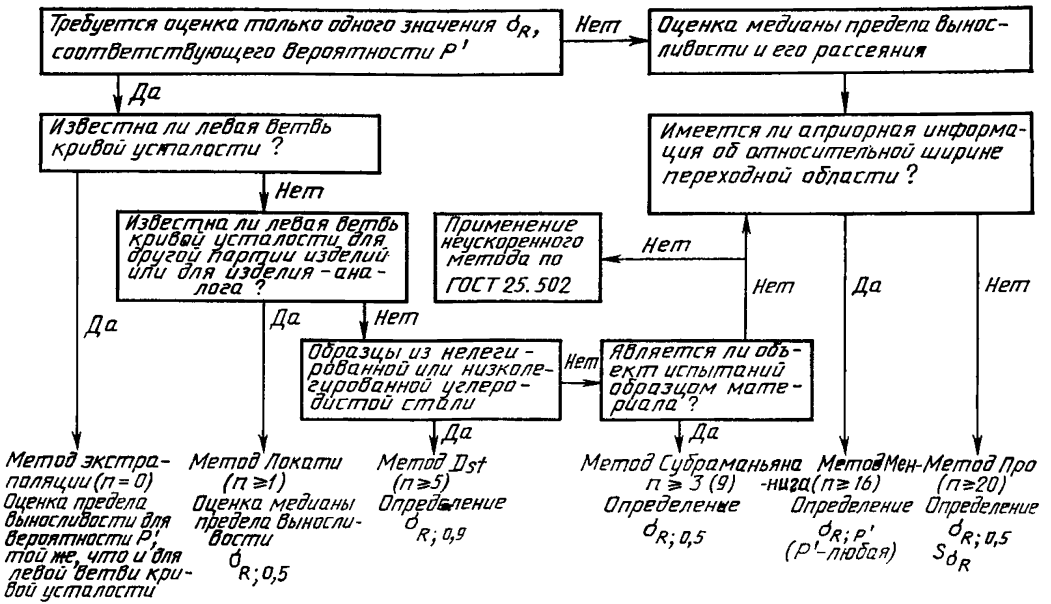
4.3. Учитывают имеющуюся априорную информацию о левой ветви кривой усталости. Если такая информация имеется, то испытания не проводят. В этом случае проводят оценку методом экстраполяции предела выносливости для вероятности P' (той же, что и для левой ветви кривой усталости). Как правило, вероятность P' принимает значения 0,5 (средняя кривая усталости) и 0,9 (нижняя кривая усталости). При отсутствии априорной информации о левой ветви кривой усталости объектов испытаний может быть использована информация о левой ветви кривой усталости для другой партии изделий или для изделия-аналога. В этом случае целесообразно использовать метод ускоренных испытаний Локати ($n \geqslant 1$), дающий оценку медианы предела выносливости.

4.4. При полном отсутствии априорной информации о левой ветви кривой усталости могут использоваться данные о материале и характере объекта испытаний.

Если образцы изготовлены из нелегированной или низколегированной углеродистой стали, то целесообразно применять метод ступенчато повышаемых деформаций (Dst — метод) ($n \geqslant 5$), который позволяет определять $\sigma_{R;0,9}$ (значение предела выносливости, соответствующее вероятности безотказной работы 0,9).

Если же объект испытаний является образцом другого класса материалов, может применяться метод Субраманьяна ($n \geqslant 3(9)$), который позволяет определить медиану предела выносливости $\sigma_{R;0,5}$. Значение $n \geqslant 9$, указанное в скобках, относится к случаю, когда левая ветвь кривой усталости неизвестна и приходится экспериментально определять две точки с координатами (σ_1, $\overline{N}_1$) и (σ_2, $\overline{N}_2$), причем для эксперимента берут по три образца на каждом уровне нагружения, а затем три образца испытывают методом Субраманьяна.

Схема выбора метода ускоренных испытаний



В случае, если объектами испытаний являются детали машин и элементы конструкций и, кроме того, требуется определить характеристики рассеяния предела выносливости, то переходят к п. 4.5, либо применяют неускоренный метод испытаний по ГОСТ 25.502.

4.5. При наличии априорной информации об относительной ширине переходной области кривой усталости применяют метод ограничения Мэннига ($n \geqslant 16$), который позволяет определить $\sigma_{R;P'}$ (P' — любая).

При отсутствии априорной информации об относительной ширине переходной области кривой усталости целесообразно применять метод прогрессивного повышения нагрузки (метод Про) ($n \geqslant 20$) для определения медианы $\sigma_{R;0,5}$ и среднего квадратического отклонения предела выносливости S_{σ_R}.

4.6. В табл. 5 методы расположены слева направо в порядке возрастания необходимого числа образцов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Обязательное

ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В НАСТОЯЩИХ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЯХ

c — постоянная при оценке предела выносливости методом возрастающей нагрузки (по методу Про);

d — вспомогательная величина, используемая в методе ограничения Мэннига;

i, j — текущие индексы;

k — номер ступени отказа при испытаниях с возрастающей нагрузкой по методу Локати;

K — постоянная в уравнении Про;

$\hat{K}$ — оценка K;

l — число различных скоростей роста напряжений в методе Про;

n — число объектов испытаний;

n_i — число циклов нагружения, пройденное объектом испытаний на i-м уровне напряжения;

m_i — число объектов, испытанных методом Про на i-й скорости роста напряжений (α_i);

N — число циклов до разрушения при одноступенчатом нагружении (долговечность);

N^*_G, $N^и_G$, N^0_G — абсцисса точки перелома кривой усталости (по ГОСТ 23207), ее нижняя и верхняя границы, соответственно;

N_D — базовое число циклов;

N_i — число циклов до разрушения при напряжении σ_{a_i};

Q — мера отклонения экспериментальных точек от прямой линии регрессии при испытаниях с возрастающей нагрузкой по методу Про;

P' — вероятность безотказной работы;

s — параметр ширины переходной области для метода ограничения Мэннига;

$S^2_{\sigma_R}$ — оценка дисперсии предела выносливости;

$P'_и$, P'_0 — вероятность безотказной работы на нижней и верхней границах переходной области соответственно;

u_{1-n} — позиционная квантиль нормированного нормального распределения;

$u_{P'}$ — квантиль нормированного нормального распределения для вероятности безотказной работы;

q — вспомогательная величина в методе Субраманьяна;

α — средняя скорость роста напряжений при испытаниях методом Про;

σ_a — амплитуда напряжений;

$\Delta\sigma$ — ступень приращения напряжений;

σ_{a_i} — амплитуда напряжения i-го уровня;

σ_{a_0} — начальное напряжение (методы Про и Мэннига);

σ_R — предел выносливости — по ГОСТ 23207;

$\overset{*}{\sigma}_R$ — предварительная оценка предела выносливости (ожидаемое значение предела выносливости);

$\sigma_{R;\,P'}$ — предел выносливости при вероятности безотказной работы P';

$\sigma_{R;\,0,5}$ — медиана предела выносливости;

$\hat{\sigma}_{R;\,0,5}$ — оценка медианы предела выносливости;

σ_p — разрушающее напряжение (при котором произошел отказ);

$\sigma_{p_{ij}}$ — разрушающее напряжение в j-м эксперименте при средней скорости роста напряжений α_i;

m^* — показатель наклона левой ветви средней кривой усталости в двойных логарифмических координатах;

$m_н$, m_0 — показатели наклона левой ветви кривых усталости для $P'_н$ и P'_0 соответственно;

$\Delta\sigma_a$ — разность амплитуд напряжений;

T_{σ_R} — условная мера рассеяния предела выносливости;

$\sigma^{E}_{цикл}$ — циклический предел упругости материала;

$\sigma^{(p)}_{-1}$ — предел выносливости образцов при растяжении-сжатии;

$\bar{\sigma}_{p_i}$ — среднее разрушающее напряжение при средней скорости роста напряжений α_i;

ε_a — амплитуда относительной деформации;

ε_{ap} — амплитуда пластической деформации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Справочное

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

1. Испытания методом Локати при статистически заданной кривой усталости (п. 2.2)

Задано: сварной образец; $m^*=3{,}75$; $m^и=3{,}5$; $n^0=4{,}0$; $P'=50\%$; $P'_и=90\%$; $P'_0=10\%$; $N^*_G=3\cdot10^6$; $\sigma^*_R=100$ МПа; $T_{\sigma_R}=\dfrac{\sigma_{R;\,0{,}9}}{\sigma_{R;\,0{,}1}}=1:1{,}5$.

Найти:

$$\hat{\sigma}_{R;\,0{,}5}.$$

Решение. Испытание методом Локати дало $k=10$ и $n_k=42500$. Для вычисления $(\Sigma n_i/N_i)^и$ и $(\Sigma n_i/N_i)^0$ используют $\sigma^и_R$, σ^0_R, $N^и_G$ и N^0_G: $N^и_G=2\cdot10^5$ $N^0_G=4{,}5\cdot10^6$, $\sigma_{a_1}=0{,}9\cdot\sigma_R=90$ МПа, $\Delta\sigma_a=9$ МПа, $n_1=7500$ $\Delta\sigma_a=67500$.

$$T_{\sigma_R}=\frac{\sigma_{R;\,0{,}9}}{\sigma_{R;\,0{,}1}}=\frac{\sigma^и_R}{\sigma^0_R};$$

$$\sigma^и_R=\sigma^*_R\,\frac{2T_{\sigma_R}}{1+T_{\sigma_R}}=80\text{ МПа},\quad \sigma^0_R=\sigma^*_R\,\frac{2}{1+T_{\sigma_R}}=120\text{ МПа}.$$

Получаем:

$$\left(\Sigma\frac{n_i}{N_i}\right)^и=\sum_{i=1}^{9}\frac{67500}{2\cdot10^6\left(\dfrac{80}{90+(i-1)9}\right)^{3,5}}+\frac{42500}{2\cdot10^6\left(\dfrac{80}{171}\right)^{3,5}}=2{,}015;$$

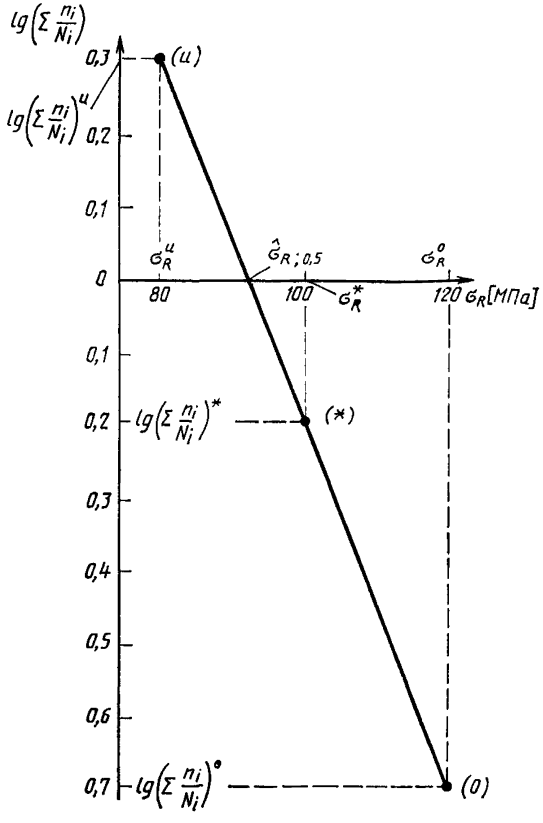
$$\left(\Sigma\frac{n_i}{N_i}\right)^*=\sum_{i=3}^{9}\frac{67500}{3\cdot10^6\left(\dfrac{100}{90+(i-1)9}\right)^{3,75}}+\frac{42500}{3\cdot10^6\left(\dfrac{100}{171}\right)^{3,75}}=0{,}636;$$

$$\left(\Sigma\frac{n_i}{N_i}\right)^0=\sum_{i=6}^{9}\frac{67500}{4{,}5\cdot10^6\left(\dfrac{120}{90+(i-1)9}\right)^{4}}+\frac{42500}{4{,}5\cdot10^6\left(\dfrac{120}{171}\right)^{4}}=0{,}202.$$

Графическая оценка дает значения $\hat{\sigma}_{R;\,0{,}5}=92$ МПа (черт. 6).

2. Ускоренная оценка среднего значения предела выносливости методом Субраманьяна (п. 2.3)

Задано: Цилиндрические образцы из арматурной стали марки 12Г2С типа VIII по ГОСТ 25.502 (ТГЛ 36766) диаметром 10 мм с кольцевым надрезом радиусом 1 мм; известны две точки на левой ветви кривой усталости (в области ограниченной выносливости) с координатами: $\sigma_{a_1}=245$ МПа, $\overline{N}_1=84400$ циклов; $\sigma_{a_2}=166{,}6$ МПа, $\overline{N}_2=3347417$ циклов.



Черт. 6

Найти: $\hat{\sigma}_{R;\,0,5}$.

Решение: 1) Проводим двухступенчатый эксперимент по схеме $\sigma_{a_1} \rightarrow \sigma_{a_2}$ по методике Субраманьяна (п. 2.3) при $n_1/\overline{N_1}=0{,}1$ ($n_1=8440$ циклов).

В итоге испытаний на уровне σ_{a_2} получен остаточный ресурс $\overline{n_2}=535100$ циклов ($\overline{n_2}/\overline{N_2}=0{,}1598$).

Вычислим значение q по формуле (11)

$$q=\frac{\ln 0{,}8402}{\ln 0{,}1}=\frac{-0{,}1741}{-2{,}3026}=0{,}0756.$$

Искомую оценку среднего значения предела выносливости вычисляют по формуле (10)

$$\hat{\sigma}_{R;\,0,5}=\frac{166,6-0,0756\cdot 245}{0,9244}=160,19\ \text{МПа}.$$

Среднее значение предела выносливости, полученное методом «лестницы» для контроля точности метода Субраманьяна, составило $\sigma_{R;\,0,5}=160$ МПа.

Таким образом, относительная погрешность в оценке предела выносливости методом Субраманьяна

$$\Delta=\frac{\hat{\sigma}_{R;\,0,5}-\sigma_{R;\,0,5}}{\sigma_{R;\,0,5}}\cdot 100\%\approx+0,12\%.$$

При тех же уровнях напряжений σ_{a_1} и σ_{a_2} испытан второй образец методом Субраманьяна, но при значении $n_1/\bar{N}_1=0,75$ ($n_1=63300$).

Остаточный ресурс образца на второй ступени (σ_{a_2}) составил $\bar{n}_2=142200$ циклов ($\bar{n}_2/\bar{N}_2=0,0425$).

При этих условиях

$$q=\frac{\ln 0,9575}{\ln 0,75}=\frac{-0,04343}{-0,2877}=0,1510;$$

$$\hat{\sigma}_{R;\,0,5}=\frac{166,6-0,1510\cdot 245}{1-0,1510}=152,64\ \text{МПа};$$

$$\Delta_{\sigma_R}=\frac{(152,64-160)}{160}\,100\%=-4,6\%.$$

Примечание. Имея две точки на кривой усталости в области ограниченной выносливости и полученное ускоренным методом Субраманьяна, значение $\hat{\sigma}_{R;\,0,5}$ можно изобразить в первом приближении всю кривую усталости.

3. Оценка медианы и среднего квадратического отклонения предела выносливости по методу Про (п. 3.1)

Задано: Значения скорости роста напряжений $\alpha_1=2,5\cdot 10^{-5}$ МПа/цикл, $\alpha_2=25\cdot 10^{-5}$ МПа/цикл.

Испытано по семь образцов на каждой скорости роста напряжений (см. табл. 6). Постоянная c принята равной $^1/_3$.

Таблица 6

МПа

i	$\sigma_{P_{ij}}$							$\bar{\sigma}_{P_i}$
1	481	502	485	480	490	507	490	490,7
2	561	538	548	548	537	543	553	546,9

Найти: $\hat{\sigma}_{R;\,0,5}$, S_{σ_R}

Решение. Для $l=2$, $m_1=\frac{n}{2}=\text{const}$ значительно упрощаются уравнения (18) и (19):

$$\overline{\alpha^c}=(\alpha_1^c+\alpha_2^c)/2.$$

$$(n-1)S_{\alpha}^2 = \sum_{i=1}^{l} m_i\alpha_i^{2c} - n(\overline{\alpha^c})^2 = \frac{n}{4}(\alpha_1^c - \alpha_2^c)^2.$$

$$\hat{K} = (\bar{\sigma}_{p_1} - \bar{\sigma}_{p_2})/(\alpha_1^c - \alpha_2^c), \qquad (24)$$

$$\hat{\sigma}_{R;\,0,5} = (\bar{\sigma}_{p_1} + \bar{\sigma}_{p_2})/2 - \frac{\alpha_1^c + \alpha_2^c}{2(\alpha_1^c - \alpha_2^c)}(\bar{\sigma}_{p_1} - \bar{\sigma}_{p_2}). \qquad (25)$$

При этом получают $\hat{K} = 1665$ (цикл/МПа)^3, $\hat{\sigma}_{R;\,0,5} = 442$ МПа.

$$S_{\sigma_p}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{7}(\sigma_{p_{ij}} - \bar{\sigma}_{p_i})^2}{12} = 88{,}85\ (\text{МПа})^2;$$

$$S_{\sigma_R}^2 = S_{\sigma_p}^2; \quad S_{\sigma_R} = 9{,}43\ \text{МПа}.$$

4. Способ ограничения Мэннига (п. 3.2)

Задано: Гладкие образцы, $\sigma_{a_0} = 140$ МПа, $N_D = 5 \cdot 10^6$, $\Delta\sigma_a = 10$ МПа.

Найти: предел выносливости для $P' = 50\%$ и $P' = 90\%$.

Решение. При $\sigma_a = \sigma_{a_0}$ проводят пробное испытание и наступает отказ до достижения базового числа циклов. Поэтому проводят испытания при $\sigma_a = \sigma_{a_0} - \Delta\sigma_a = 130$ МПа (отказ) и при $\sigma_a = \sigma_{a_0} - 2\Delta\sigma = 120$ МПа (отказ).

При $\sigma_a = 110$ МПа наступает в первый раз прохождение базового числа циклов без разрушения, таким образом здесь останавливаемся и проводим еще четыре испытания, которые дают по два отказа и неразрушения (итак $n = 5$, $\sigma_{a_1} = 110$ МПа, $i_1 = 2$).

Приняв $s = 0{,}2$ по табл. 2, обращаемся к уравнению (22)

$$\sigma_{a_2} = \sigma_{a_1}[1 + (1 - {}^2/_5)0{,}2] = 123{,}2\ \text{МПа}.$$

Уровень выбирают равным $\sigma_{a_2} = 130$ МПа (1-й случай) или $\sigma_{a_2} = 120$ МПа (2-й случай), где уже было по 1-му отказу, так что еще нужно будет провести только четыре испытания.

1-й случай

Четыре эксперимента дали один случай неразрушения и три отказа. Следовательно, $i_2 = 4$ (с учетом ранее полученного отказа). Если $u_{2;\,5} = -0{,}495$, то $u_{4;\,5} = 0{,}495$ (табл. 4) и $u_{0;\,5} = 0$, то $u_{0;\,1} = -1{,}2816$ (табл. 3), тогда получим по формуле (23):

$$\hat{\sigma}_{R;\,0,5} = 110 + 20\frac{-0{,}495}{-0{,}495 - 0{,}495} = 120\ \text{МПа},$$

$$\sigma_{R;\,0,9} = 110 + 20\frac{-0{,}495 + 1{,}2816}{-0{,}495 - 0{,}495} = 94{,}4\ \text{МПа}.$$

2-й случай

Четыре эксперимента дали два случая неразрушения и два отказа. Итак, $i_2 = 3$ (с учетом ранее полученного на этом уровне напряжения отказа). Для $u_{3;\,5} = 0$ получим по формуле (23):

$$\sigma_{R;\,0,5} = 110 + 10\,\frac{-0,495}{-0,495} = 120 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{R;\,0,9} = 110 + 10\,\frac{-0,495 + 1,2816}{-0,495} = 94,1 \text{ МПа}.$$

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. **РАЗРАБОТАН Государственным комитетом СССР по стандартам, Министерством высшего и среднего специального образования СССР**

ИСПОЛНИТЕЛИ

В. Л. Соболев, канд. техн. наук; **Б. В. Бойцов,** д-р техн. наук (руководители темы); **А. И. Кубарев,** канд. техн. наук; **А. А. Фортунин; А. В. Плутоловский; Г. Н. Кравченко,** канд. техн. наук; **А. Л. Иванов; Н. С. Костин**

ВНЕСЕН Государственным комитетом СССР по стандартам

2. **УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26.04.89 № 1126**

3. **Срок первой проверки 2000 г., периодичность проверки 5 лет.**

4. **Настоящие методические указания полностью унифицированы со стандартом ГДР ТГЛ 19338 «Сопротивление усталости. Ускоренные испытания для оценки пределов выносливости»**

5. **ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ**

6. **ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ**

Обозначение НТД, на который дана ссылка	Номер пункта, приложения
ГОСТ 25.502—79	2.1, приложение 2
ГОСТ 25.504—82	2.1
ГОСТ 23207—78	Вводная часть, приложение 1
ТГЛ 19338	Вводная часть, приложение 1
ТГЛ 36766	Приложение 2

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 1
2. МЕТОДЫ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ 3
2.1. Определение предела выносливости экстраполяцией левой ветви кривой усталости 3
2.2. Определение предела выносливости методом Локати 4
2.3. Определение предела выносливости по методу Субраманьяна . . 6
2.4. Определение предела выносливости при помощи метода ступенчато повышаемых деформаций (Dst — метод) 7
3. МЕТОДЫ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ 9
3.1. Метод прогрессивного повышения нагрузки для определения медианы и среднего квадратического отклонения предела выносливости (метод Про) 9
3.2. Метод ограничения Мэннига 11
4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ 14
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Обозначения, применяемые в настоящих методических указаниях 17
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Примеры применения методов ускоренных испытаний
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ 19

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Надежность в технике

Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций

РД 50—686—89

Редактор *М. В. Глушкова*
Технический редактор *О. Н. Никитина*
Корректор *М. М. Герасименко*

Сдано в наб. 19.06.89 Подп. в печ. 06.02.90 Формат 60×90$^{1}/_{16}$ Бумага писчая № 1 Гарнитура литературная Печать высокая 1,75 усл. п. л. 1,75 усл. кр.-отт. 1,42 уч.-изд. л. Тир. 18 000 Зак. 1491 Цена 10 к. Изд. № 205/4

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123557, Москва, ГСП, Новопресненский пер., д. 3.
ческая типография Издательства стандартов, ул. Даряус и Гирено, 39.

gost.e-ecolog.ru