Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 58999-2020 "Лопатки газотурбинных двигателей. Периодические испытания на усталость" (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 августа 2020 г. N 597-ст)

Gas turbine engine blades. Periodic fatigue testing

ОКС 03.100.01

Дата введения - 1 января 2021 г.
Введен впервые

Предисловие

1 Разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова" (ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова")

2 Внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 323 "Авиационная техника"

3 Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 августа 2020 г. N 597-ст

4 Введен впервые

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает правила проведения периодических испытаний на усталость профильной части и ножки хвостовика лопаток.

Стандарт предназначен для контроля сопротивления усталости с целью подтверждения стабильности технологии по обеспечению требуемого сопротивления усталости окончательно изготовленных лопаток.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий стандарт:

ГОСТ 23207 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения

Примечание - При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования - на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю "Национальные стандарты", который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя "Национальные стандарты" за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 23207.

3.2 В настоящем стандарте использованы следующие обозначения и сокращения:

σ - напряжение, МПа;

$\sigma_к$ - напряжение, при котором проводят контрольное испытание; (контрольный уровень напряжения), МПа;

$(\bar{\sigma}_{-1})_{2\cdot10^5}$, $(\bar{\sigma}_{-1})_{2\cdot10^6}$, $(\bar{\sigma}_{-1})_{2\cdot10^7}$ - пределы выносливости на базах, соответственно, $2\cdot10^5$, $2\cdot10^6$, $2\cdot10^7$ циклов нагружения для вероятности разрушения 0,5, МПа;

$(\sigma_{-1})_{2\cdot10^7}$ - предел выносливости на базе $2\cdot10^7$ циклов, определенный по шести и более неразрушившимся лопаткам, МПа;

N - число циклов до разрушения, или экспериментальная долговечность;

N_k - базовое число циклов нагружения или контрольная долговечность;

n* - число лопаток в партии, шт.;

n - число испытываемых лопаток или объем выборки из партии, шт.;

m - параметр для левой или правой ветви кривой усталости;

S_{lgN} - среднее квадратическое отклонение (СКО) логарифма чисел циклов;

P - доля статистически дефектных лопаток партии (вероятность);

n_d - число дефектных лопаток в выборке, шт.;

n_c - приемочное число дефектных лопаток в контрольной выборке (допустимое значение $n_d < n_c$), шт.;

P_1 - доля статистически дефектных лопаток в партии при нормальном ходе производства (вероятность);

Z_{P_1} - квантиль, соответствующий вероятности P_1;

P_2 - доля статистически дефектных лопаток в партии, допустимая для работы изделия (вероятность);

α - риск изготовителя или вероятность забраковать годную партию;

β - риск заказчика или вероятность принять негодную продукцию;

j - обозначение j-й лопатки на i-м уровне напряжений σ_i;

n_i - число лопаток, испытанных на i-м уровне напряжений σ_i, шт.;

ОТК - отдел технического контроля.

4 Общие положения

4.1 Периодические испытания на усталость профильных частей и ножек хвостовиков лопаток, проводимые по настоящему стандарту, характеризуют стабильность производственного процесса по величине предела выносливости с определенной вероятностью его соответствия норме контролируемой характеристики, без выполнения статистических вычислений и графических операций в процессе контроля.

4.2 При периодических испытаниях на усталость согласно настоящему стандарту используются

контрольные нормативы, представляющие собой контрольный уровень напряжения σ_k , базовое число циклов нагружения N_k и число испытываемых лопаток n.

Контрольный уровень напряжения σ_k , значения N_k и n определяют к началу серийного производства и применяют на протяжении периода установившегося состояния производства. При изменении предела выносливости лопаток более чем на 20 % в связи с конструктивными или технологическими мероприятиями необходимо пересматривать контрольный уровень напряжения σ_k .

4.3 Назначение контрольных нормативов при периодических испытаниях на усталость лопаток из анизотропных материалов (монокристаллов, композитных материалов и др.) должно соответствовать методам оценки предела выносливости.

4.4 Для обеспечения соответствия лопаток служебным функциям изделия (двигателя) и принятому методу производства при назначении контрольных нормативов учитывают действующие системы определения надежности через запасы прочности, имеющиеся случаи разрушения лопаток при доводке и эксплуатации серийной компоновки изделия, особенности технологии изготовления лопаток.

5 Отбор лопаток для периодических испытаний

5.1 В технической документации на лопатки должны быть указаны объем партии, номера ступеней, подвергаемых испытаниям, периодичность испытаний на усталость, порядок отбора лопаток с учетом требований по 4.3.

5.2 Для периодических испытаний на усталость отбирают лопатки, признанные годными по поверяемой части ОТК и принятые представителем заказчика.

6 Подготовка и проведение периодических испытаний

6.1 Контрольный уровень напряжения σ_k определяют исходя из:

- уравнения кривой усталости

$$\sigma^m \cdot N = \text{const} \quad (1)$$

;

- среднего квадратического отклонения S_{lgN};

- доли статистически дефектных лопаток в партии P_1 при нормальном ходе производства;

- базового числа циклов нагружения N_k при проведении периодических испытаний.

6.1.1 Определение параметров уравнения кривой усталости

6.1.1.1 Параметр m уравнения (1) кривой усталости лопаток определяют, используя стандартный метод испытания на усталость.

6.1.1.2 Если на предприятии-изготовителе выполняются испытания на усталость и накопленные результаты позволяют построить кривую усталости и определить параметры уравнения (1), их используют для соответствующей ступени двигателя для выбора уровня напряжений на базе N = $2 \cdot 10^6$ циклов. Результаты накопленных испытаний должны быть получены при напряжениях, соответствующих базам N = $2 \cdot 10^5$ и N = 10^7 циклов.

6.1.2 Определение среднего квадратического отклонения

6.1.2.1 Среднее квадратическое отклонение логарифма долговечности S_{lgN} рекомендуется определять по результатам испытаний не менее 20 лопаток на уровне напряжений,

соответствующем среднему значению предела выносливости для базы N = $2 \cdot 10^6$ циклов по уравнению (1).

Допускается определят S_{lgN} с помощью регрессионного анализа результатов усталостных испытаний согласно приложению Б.

6.1.2.2 Если для определения S_{lgN} не представляется возможным провести испытания на усталость лопаток, то следует использовать имеющиеся данные по определению S_{lgN} для лопаток из того же материала, отличающихся по размерам не более чем в два раза и изготовленных по одинаковой технологии.

6.1.3 Определение контрольного уровня напряжения при периодических испытаниях на усталость

6.1.3.1 Контрольный уровень напряжения σ_k определяют по номограммам, приведенным в приложении А, или расчетом по зависимости, приведенной в приложении Б.

6.2 Контрольный норматив по числу испытываемых лопаток n от партии определяют по приложению В по совокупности значений, заданных в нормативно-технической документации на продукцию:

- доли статистически дефектных изделий в партии при нормальном ходе производства P_1;

- доли статистически дефектных лопаток в партии, допустимой для работы изделия P_2;

- риска изготовителя α ;

- риска заказчика β .

6.3 Значение N_k для лопаток выбирается равным $2 \cdot 10^6$ циклов.

6.4 Испытания всех n лопаток выборки проводят при контрольном уровне напряжения σ_k до базового числа циклов нагружения N_k или до разрушения.

6.5 После испытания на усталость все лопатки подлежат контролю по принятой при производстве лопаток технологии обнаружения дефектов (трещин).

6.6 Разрушение лопаток по хвостовику (месту крепления) при испытаниях на усталость профильной части и/или ножки хвостовика не учитывается. Результат считается удовлетворительным, если лопатка прошла базу N_k. В случае разрушения места крепления до прохождения базы N_k требуется повторение испытания на дополнительном экземпляре лопатки.

6.7 При отсутствии левой ветки кривой усталости и рассчитанного контрольного напряжения допускается проводить периодический контроль на базе N = $2 \cdot 10^7$ циклов при напряжении $\sigma_k = a \cdot (\sigma_{-1})_{2 \cdot 10^7}$, где коэффициент a ($\leq$ 1,0) выбирается по результатам сравнения запаса по вибронапряжениям K_V и нормируемого значения K_V.

7 Обработка результатов периодических испытаний

7.1 Результаты периодических испытаний считаются удовлетворительными, если все n лопаток не были разрушены на контрольном уровне напряжения σ_k и базовом числе циклов нагружения N_k. При положительных результатах испытаний должно быть принято согласованное с заказчиком решение о годности проверяемой партии. В случае разрушения хотя бы одной лопатки проводят испытания с удвоенным количеством лопаток той же партии, при тех же значениях контрольных нормативов σ_k и N_k.

7.2 При неудовлетворительных результатах повторных испытаний должна быть выявлена причина уменьшения сопротивления усталости, и принято решение о введении мероприятий по увеличению сопротивления усталости с определением предела выносливости и пересмотром контрольного уровня напряжения σ_k .

Одновременно должно быть принято согласованное с заказчиком решение о годности проверяемой партии.

7.3 Если в процессе эксплуатации и работы на стенде в течение двух-пяти лет не наблюдалось дефектов лопаток контролируемой ступени, а результаты периодических испытаний в течение последнего года удовлетворительны, то разрешается увеличить межконтрольный период до одного года.

В случае появления дефектов на лопатках контролируемой ступени при годичном межконтрольном периоде, в зависимости от результатов исследования таких лопаток, принимается решение о необходимости изменения контрольного периода.

7.4 Накопленные результаты периодических испытаний необходимо использовать для поддержания стабильности технологии, обеспечивающей требуемое сопротивление усталости лопаток, и обоснования необходимой частоты контроля.

Приложение А
(рекомендуемое)

Номограммы для определения напряжения

А.1 Определение контрольного уровня напряжения σ_k проводят по известным кривым усталости с показателем степени m и S_{lgN} по уровням напряжений. Задав долю P_1 и контрольную долговечность N_k, определяют контрольный уровень напряжения σ_k, при котором с вероятностью (1 - P_1) не должно произойти разрушения.

А.2 Номограмма для определения контрольного уровня напряжения σ_k строится по параметру показателя степени m при заданных значениях P_1 и N_k.

А.3 Номограмма определения контрольного уровня напряжения σ_k для P_1 = 0,005; N_k = $2 \cdot 10^6$ приведена на рисунке А.1.

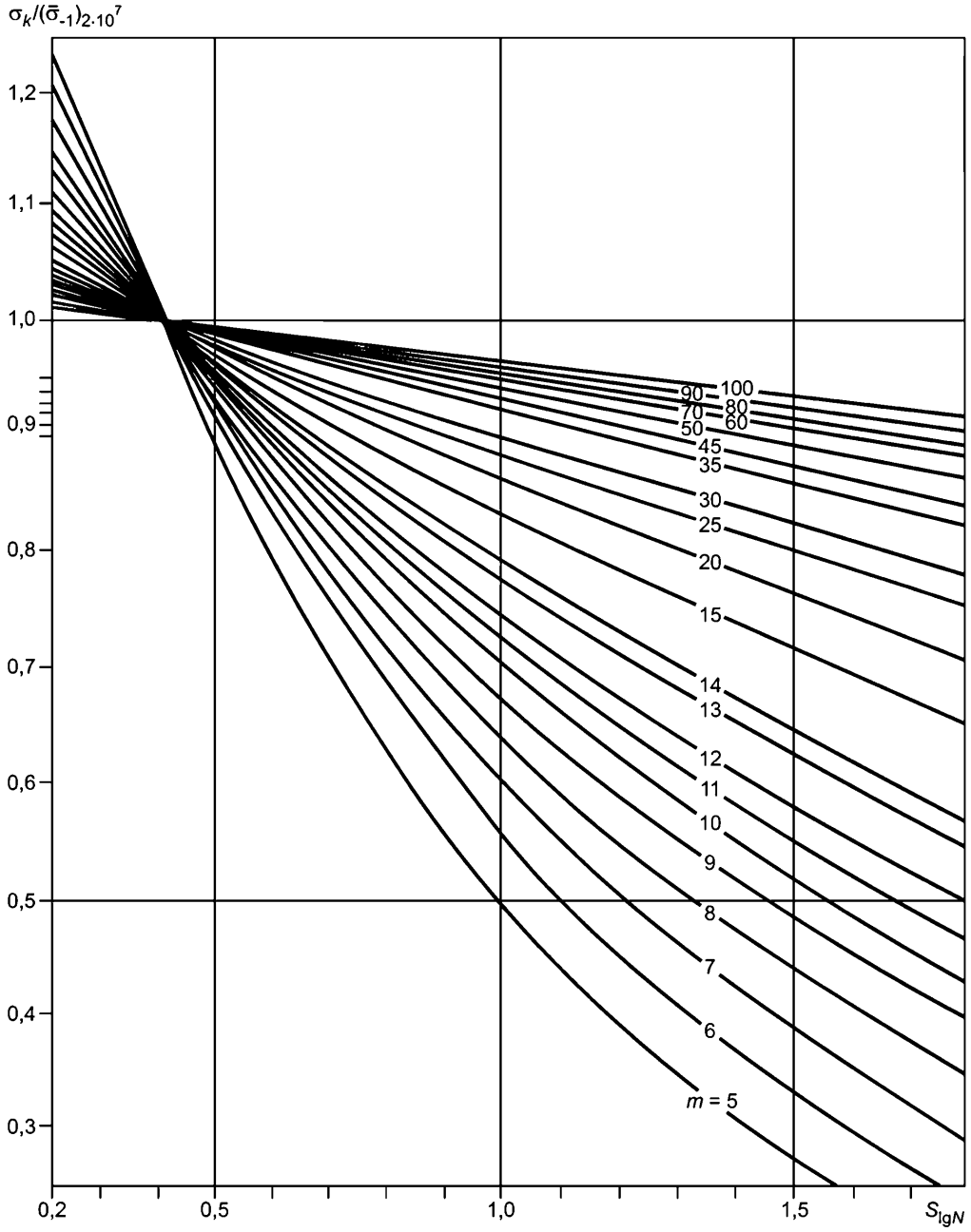

Рисунок А.1

А.4 Номограмма определения контрольного уровня напряжения σ_k для P_1 = 0,010; N_k = $2 \cdot 10^6$ приведена на рисунке А.2.

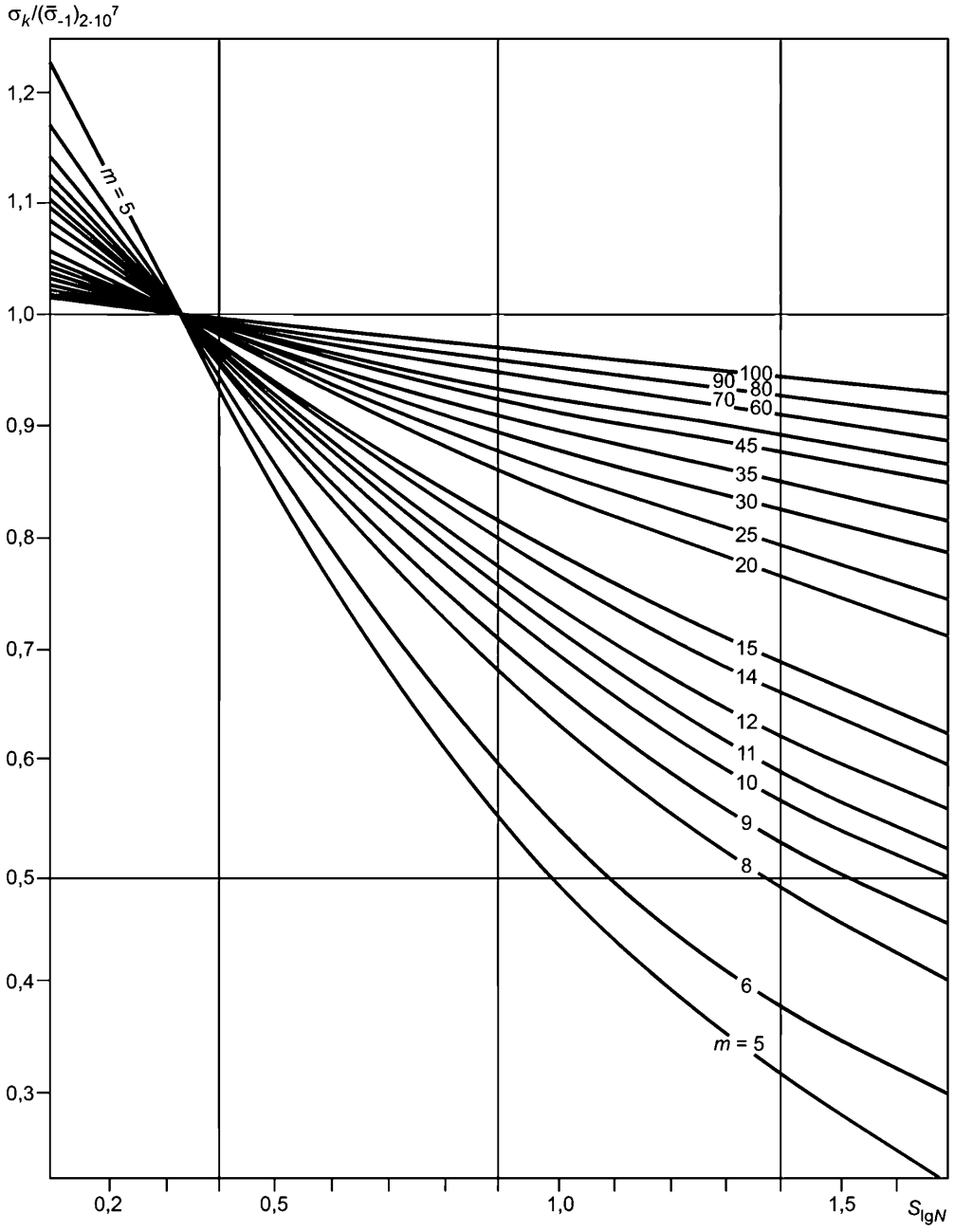

Рисунок А.2

А.5 Номограмма определения контрольного уровня напряжения σ_k для P_1 = 0,020; N_k = $2 \cdot 10^6$ приведена на рисунке А.3.

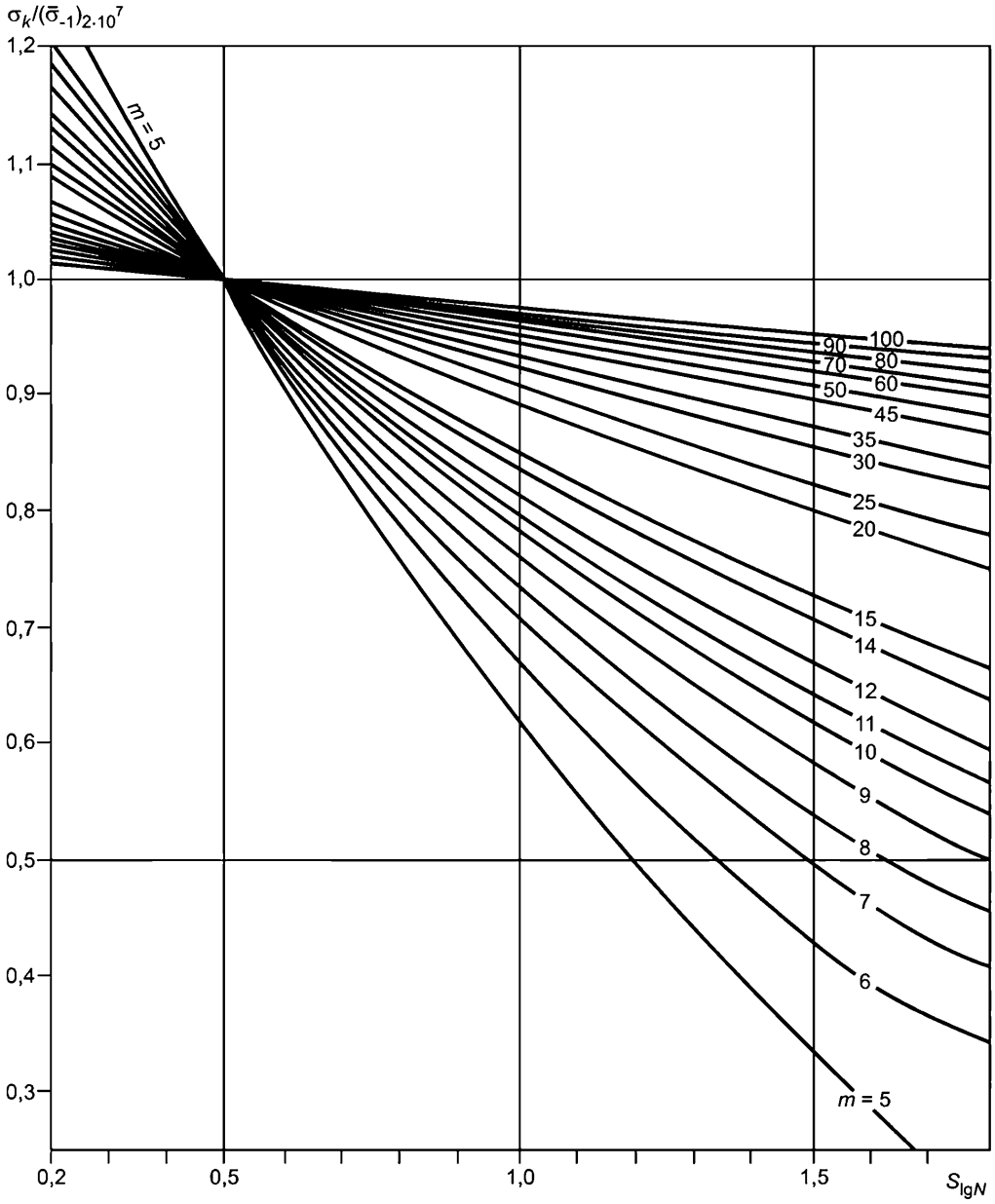

Рисунок А.3

Приложение Б
(рекомендуемое)

Пример определения контрольного уровня напряжения

Б.1 Испытания для оценки кривой усталости проводят не менее чем при трех амплитудах напряжений цикла, используя не менее четырех лопаток при каждой амплитуде.

Б.2 Для повышения точности оценки контрольного уровня напряжений целесообразно нижний $(\sigma_a)_{N_1}$ и верхний $(\sigma_a)_{N_2}$ уровни амплитуд напряжений назначать близкими к напряжениям, соответствующим базовым числам циклов $N_1 = 10^7$ и $N_2 = 2 \cdot 10^5$ соответственно по предполагаемой средней кривой усталости. В этом случае база $N_k = 2 \cdot 10^6$ циклов, соответствующая контрольному уровню напряжений, будет находиться в центральной части оцененной кривой усталости. Оценка значений $(\sigma_a)_{N_1}$ и $(\sigma_a)_{N_2}$ может быть получена методом ступенчато-увеличивающейся нагрузки по результатам испытаний четырех лопаток (по две для каждого базового числа циклов).

Дополнительно проводят испытания на одном или двух равноотстоящих уровнях амплитуд

напряжений.

Б.3 Для назначения уровней амплитуд напряжений σ_{a_i} при усталостных испытаниях компрессорных лопаток из стали марки ЭИ-961Ш проведены испытания четырех лопаток методом ступенчато увеличивающейся нагрузки (две лопатки для базового числа циклов N = $2 \cdot 10^5$ и две лопатки для базового числа циклов N = 10^7). Результаты испытаний представлены в таблице В.1.

Б.4 Начальный уровень напряжений:

$$\sigma_0 = 0{,}8 \cdot (\bar{\sigma}_{-1})_{2 \cdot 10^5} = 0{,}8 \cdot 800 = 640 \text{ МПа — для лопаток 1 и 2}$$

,

$$\sigma_0 = 0{,}8 \cdot (\bar{\sigma}_{-1})_{10^7} = 0{,}8 \cdot 550 = 440 \text{ МПа — для лопаток 3 и 4}$$

,

где $(\bar{\sigma}_{-1})_{2 \cdot 10^5}$ и $(\bar{\sigma}_{-1})_{2 \cdot 10^7}$ взяты по результатам испытаний аналогичных лопаток.

Ступень напряжения $\Delta\sigma = \sigma_i - \sigma_{i-1} = 40$ МПа (ступень рекомендуется выбирать в диапазоне 20-60 МПа в зависимости от наклона кривой усталости).

Б.5 Значение $(\sigma_{-1})_N$ определяется как среднее по двум лопаткам. Для каждой лопатки

$$(\sigma_{-1})_N = \sigma_P - \frac{\Delta\sigma}{2}$$

,

где σ_P - разрушающее напряжение, МПа.

$$(\bar{\sigma}_{-1})_{2 \cdot 10^5} = 740 \text{ МПа}; \ (\sigma_{-1})_{10^7} = \frac{460 + 540}{2} = 500 \text{ МПа}$$

.

Таблица Б.1

Номер лопатки	σ_0, МПа	$\Delta\sigma$, МПа	N циклов	σ_P, МПа	$N_P^* \cdot 10^{-6}$ циклов	$(\sigma_{-1})_N$, МПа
1	640	40	$2 \cdot 10^5$	760	0,06	740
2					0,08	
3	440		10^7	480	8,10	460
4				560	3,10	540
* N_p - число циклов до разрушения лопатки на уровне σ_P .						

Б.6 Назначаются уровни амплитуд напряжений σ_{a_i} для испытаний по полученной кривой усталости, равные:

$$\sigma_{a_1} = (\sigma_{-1})_{10^7} = 500 \text{ МПа}$$

,

$$\sigma_{a_3} = (\sigma_{-1})_{2 \cdot 10^5} = 740 \text{ Мпа}$$

,

$$\sigma_{a_2} = \frac{\sigma_{a_1} + \sigma_{a_3}}{2} = \frac{500 + 740}{2} = 620 \text{ МПа}$$

Б.7 Для получения кривой усталости и оценки значения S_{lgN} проведены испытания на усталость 21-й лопатки (по семь лопаток на каждом уровне напряжений). Результаты испытаний приведены на рисунке Б.4 и в таблице Б.2.

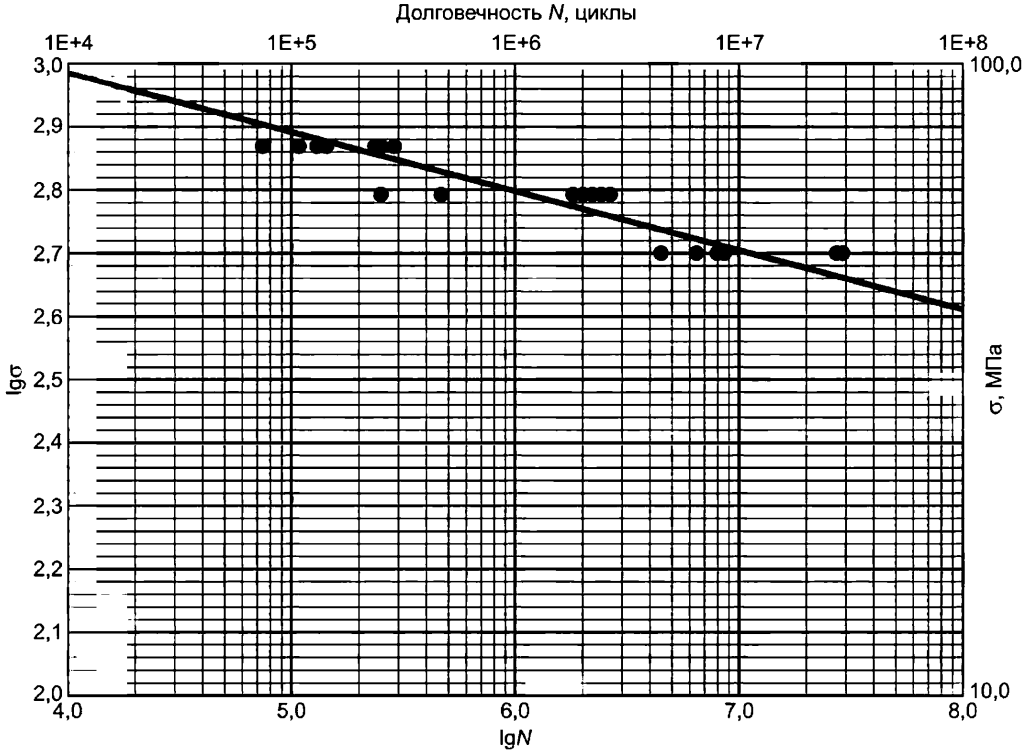

Рисунок Б.4

Таблица Б.2

Номер уровня i	Уровень напряжения σ_{ai}, МПа	Номер образца	$N \cdot 10^{-6}$ циклов	Число образцов на уровне
1	500	1	4,470	7
		2	6,460	
		3	7,940	
		4	8,320	
		5	8,510	
		6	27,500	
		7	28,800	
2	620	1	0,250	
		2	0,470	
		3	1,820	
		4	2,000	
		5	2,190	
		6	2,450	
		7	2,690	
3	740	1	0,074	
		2	0,107	
		3	0,129	
		4	0,144	
		5	0,240	
		6	0,251	
		7	0,288	

Б.8 Параметры $\hat{a}$ и $\hat{b}$ уравнения кривой усталости

$$Y = \hat{a} + \hat{b} \cdot (X - \overline{\overline{X}}),$$

(Б.1)

где X = lg σ ; Y = lg N.

Значение S_{lgN} определяют с помощью линейного регрессионного анализа, пренебрегая изменением дисперсии долговечности на рассматриваемом участке кривой усталости $S_{lgN^2} \approx$ const. Формулы для расчета SlgN:

$$\hat{\hat{X}} = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^{k} n_i}; \quad \hat{\overline{Y}}_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} Y_{ij}}{n_i}; \quad \hat{\hat{Y}} = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot \hat{\overline{Y}}_i}{\sum_{i=1}^{k} n_i};$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot \left(X_i - \hat{\hat{X}}\right) \hat{\overline{Y}}_i}{\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot \left(X_i - \hat{\hat{X}}\right)^2}; \quad \hat{a} = \hat{\hat{Y}}; \quad Y_{i\,\text{регр}} = \hat{a} + \hat{b} \cdot X_i;$$

$$S_{lgN} = S_{Y\,\text{регр}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} \left(\hat{\overline{Y}}_i - Y_{i\,\text{регр}}\right)^2}{\sum_{i=1}^{k} n_i - 2}}.$$

(Б.2)

Точность расчета должна быть не ниже шести знаков.

Б.9 Результаты регрессионного анализа представлены в таблице Б.3.

Таблица Б.3

$\hat{\overline{\overline{X}}}$	$\hat{\overline{\overline{Y}}}$	$m = -\hat{b}$	$r_{Y/X}$	S_{lgN}	n
2,79	6,11	10,6	-0,93	0,32	21

Б.10 Контрольный уровень напряжения σ_k для базы $N_k = 2 \cdot 10^6$ рассчитывают по формуле

$$\lg\sigma_k = \hat{\overline{\lg\sigma}}_{-1N_k} + U_P \hat{S}_{\lg\sigma_{-1}}$$

,

(Б.3)

где

$$\hat{\overline{\lg\sigma}}_{-1N_K} = X_K = \frac{Y_K - \hat{a}}{\hat{b}} + \overline{\overline{X}}$$

,

(Б.4)

$$\hat{S}_{\lg\sigma_{-1}} = \frac{\hat{S}_{\lg N}}{|b|},\ Y_k = \lg N_k,\ U_{(P\,=\,0{,}005)} = -2{,}58$$

,

$$Y_k = \lg N_k = \lg(2 \cdot 10^6) = 6{,}3$$

,

$$\hat{a} = \hat{\overline{\overline{Y}}} = 6{,}11,\ \ \hat{b} = -\,m = -\,10{,}6$$

,

$$\hat{\overline{\lg\sigma}}_{-1N_k} = \frac{6{,}3 - 6{,}11}{-10{,}6} + 2{,}79 = 2{,}77$$

,

$$\hat{S}_{\lg\sigma_{-1}} = \frac{0{,}32}{|-10{,}6|} = 0{,}03$$

,

$$\lg\sigma_k = 2{,}77 - 2{,}58 \cdot 0{,}03 = 2{,}69$$

,

тогда σ_k = $10^{2,69}$ = 489 МПа.

Б.11 При расчете σ_k с использованием формулы (Б.4) и номограммы (рисунок А.1, приложение А) при S_{lgN} = 0,32, m = 10,6, P_1 = 0,005 и $N_k = 2 \cdot 10^6$ имеем:

$$\frac{\sigma_k}{\left|\bar{\sigma}_{-1}\right|_{2\cdot 10^7}} = 1{,}05$$

.

$$\lg(\bar{\sigma}_{-1})_{2\cdot 10^7} = \frac{\lg 2\cdot 10^7 - \hat{a}}{\hat{b}} + \bar{\bar{X}} = \frac{7{,}3 - 6{,}11}{-10{,}6} + 2{,}79 = 2{,}67$$

.

Тогда $(\bar{\sigma}_{-1})_{2\cdot 10^7}$ = $10^{2,67}$ = 468 МПа и σ_k = $1{,}05 \cdot 468$ = 491 МПа.

Б.12 Выбирают контрольные нормативы: P_1 = 0,005; $N_k = 2 \cdot 10^6$, σ_k = 491 МПа, равные расчетным.

Число испытываемых лопаток в контрольной партии n = 6, при этом α = 0,003, что соответствует рекомендуемым значениям.

Б.13 Обозначения, принятые в расчете:

$X_C = \bar{\bar{X}}$ - среднее значение независимой переменной X или lgσ ;

$Y_C = \bar{\bar{Y}}$ - среднее значение независимой переменной Y или lgN;

$S_Y = S_{Y\ регр}$ - среднее квадратическое отклонение (СКО) S_{lgN} вокруг линии регрессии;

$S_X = \frac{S_Y}{|\hat{b}|}$ - с.к.о. логарифма напряжений $S_{lg\sigma_{-1}}$;

B = $\hat{b}$ - показатель наклона кривой усталости;

$T_B = \frac{|B|}{S_B}$ - отношение модуля выборочного значения коэффициента уравнения B к его СКО (отношение Стьюдента), характеризующее значимость коэффициента;

R = $r_{Y/X}$ - коэффициент корреляции между Y и X, характеризующий тесноту линейной связи.

Приложение В
(рекомендуемое)

Определение расчетного значения количества лопаток для испытания на усталость

В.1 Для случая, когда в контролируемой выборке из n лопаток не должно содержаться ни одной дефектной лопатки, используется биномиальное распределение числа дефектных деталей выборки для построения оперативной характеристики.

В.2 Значения α, P_2 при заданных значениях P_1 следует выбирать по таблице В.1. Для всех n принято β = 0,1.

Таблица В.1

P_1	α	P_2	α	P_2	α	P_2
	n = 1		n = 2		n = 3	
0,0035	0,0040	0,90	0,0070	0,68	0,010	0,54
0,0050	0,0055		0,0100		0,015	
0,0100	0,0100		0,0200		0,030	
0,0200	0,0190		0,0380		0,059	

P_1	α	P_2	α	P_2	α	P_2
	n = 4		n = 5		n = 6	
0,0035	0,014	0,44	0,0170	0,37	0,020	0,32
0,0050	0,020		0,0250		0,030	
0,0100	0,038		0,0490		0,058	
0,0200	0,078		0,0096		0,118	

В.3 На основании анализа предшествующего контроля лопаток на усталость рекомендуется выбирать значения:

P_1 = 0,0035...0,0100; α = 0,02...0,06; β = 0,1; n = 6.