

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. Г. СТАКЯН, С. А. ГАСПАРЯН, С. Л. МАК

К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ
 СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

Влияние концентрации напряжений при циклических испытаниях оценивается эффективным коэффициентом концентрации напряжений (ЭККН), равным отношению пределов выносливости гладких и надрезанных образцов:

$$K_{ЭКН} = \frac{\sigma_{rH}}{\sigma_{rHn}} \quad (1)$$

ЭККН — величина статистическая, так как пределы выносливости являются случайными величинами; если их представить в виде

$$\sigma_{rH} = \bar{\sigma}_r + uS_r = \bar{\sigma}_r(1 + uV_r), \quad (2)$$

то

$$K_{ЭКН} = \frac{\bar{\sigma}_r(1 + uV_r)}{\bar{\sigma}_{rH}(1 + uV_{rH})} = \bar{K}_n A_n, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_r$ ($\bar{\sigma}_{rH}$) — средневероятностное значение σ_r (σ_{rH});

u — квантиль нормального распределения;

S_r (S_{rH}) — среднеквадратичное отклонение σ_r (σ_{rH});

V_r (V_{rH}) — вариационный коэффициент σ_r (σ_{rH});

\bar{K}_n — средневероятностное значение ЭККН;

A_n — вероятностный коэффициент.

Величина A_n отлична от единицы, так как V_r и V_{rH} на уровне длительных пределов выносливости меняются в интервале (0,02–0,15) [1]; при этом минимальные значения соответствуют надрезанным образцам. Так, например, при значениях $V_r = 0,15$, $V_{rH} = 0,03$ и вероятностях неразрушения $I(N) = (10 + 99,9)\%$ (соответственно $u = +1,24$; $-3,32$) $A_n = 1,14 \pm 0,56$. Такое возможное изменение A_n должно быть учтено в расчетах на прочность.

В связи с естественным разбросом данных циклических испытаний значения $K_{ЭКН}$ случайны во всем интервале долговечностей N и они могут быть определены при использовании уравнений кривых выносливости [1]:

$$\lg N_i = -(\bar{m}_{50} + uS_m)(\lg \sigma_i - \lg \sigma) + (\lg N + uS_N) \quad (4)$$

или

$$\lg N_i = C_a - m_a \lg z_i, \quad (5)$$

где

$$C_a = (\overline{m}_{30} + uS_m) \lg \bar{z} - (\lg \bar{N} - uS_{N_r}); \quad m_a = (\overline{m}_{30} + uS_m).$$

Здесь C_a , m_a — соответственно параметр и показатель наклона кривой выносливости при заданной вероятности неразрушения $U(N)$.

На рис. 1 представлен общий случай взаимного расположения кривых выносливости гладких и надрезанных образцов. Здесь переход от наклонной части кривой к горизонтальной аппроксимирован прямой линией до точки перегиба $N_0(N_{0k})$, соответствующей кривой с $U(N) = 50\%$. Полученные таким образом графики удовлетворительно согласуются с данными [1].

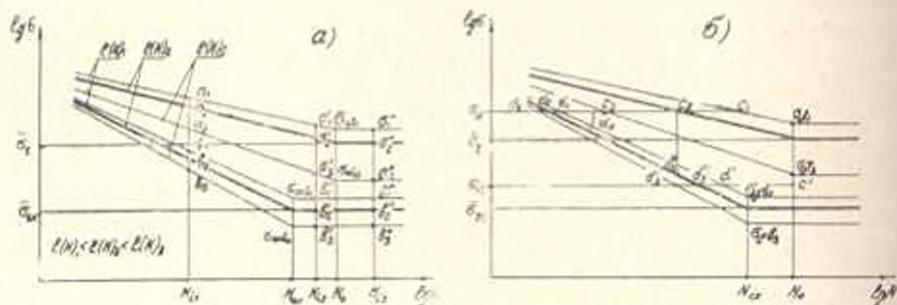


Рис. 1. К определению зависимостей:
а — $K_{30} = f[N, U(N)]$; б — $K_{N_0} = f[z, U(N)]$

В подавляющем большинстве случаев наблюдается неравенство $N_0 < N_{0k}$, поэтому для анализа значений K_{30} выделим следующие зоны долговечностей (рис. 1, а).

I зона — $N_i < N_{0k}$. При $N_{i1} = \text{const}$ $\lg K_{301} = a_1 b_1$, $\lg K_{302} = a_2 b_2$, $\lg K_{303} = a_3 b_3$, . . . Так как $\lg K_{30} = \lg z_{r_n} - \lg z_{r_n}$, то значения z_{r_n} и z_{r_n} могут быть определены согласно (5):

$$\lg z_{r_n} = \frac{C_a - \lg N_i}{m_a}, \quad \lg z_{r_n} = \frac{C_{a0} - \lg N_i}{m_{a0}}$$

тогда

$$\lg K_{30} = \left| \frac{C_a}{m_a} - \frac{C_{a0}}{m_{a0}} \right| - \left| \frac{1}{m_{a0}} - \frac{1}{m_a} \right| \lg N_i. \quad (6)$$

II зона — $N_{0k} \leq N_i \leq N_0$. При $N_{i2} = \text{const}$ $\lg K_{301} = a_1 b_1$, $\lg K_{302} = a_2 b_2$, $\lg K_{303} = a_3 b_3$, . . . Здесь

$$\lg z_{r_n} = \frac{C_a - \lg N_i}{m_a}, \quad \lg z_{r_n} = \frac{C_{a0} - \lg N_{0k}}{m_{a0}},$$

поэтому

$$\lg K_{30} = \left| \frac{C_a}{m_a} - \frac{C_{a0} - \lg N_{0k}}{m_{a0}} \right| - \frac{1}{m_a} \lg N_i. \quad (7)$$

III зона — $N_I > N_0$. При $N_{I3} = \text{const}$ $\lg K_{N01} = a_1^* b_1^*$, $\lg K_{N02} = a_2^* b_2^*$, $\lg K_{N03} = a_3^* b_3^*$...

$$\text{Тогда } \lg K_{N0} = \left[\frac{C_n}{m_n} - \frac{C_{k_n}}{m_{k_n}} \right] + \left[\frac{\lg N_{0k}}{m_{k_n}} - \frac{\lg N_0}{m_n} \right]. \quad (8)$$

Для некоторых групп деталей и узлов машин, работающих в условиях перегрузок, расчет на долговечность часто является основным. Так как при этом, даже при незначительных изменениях уровня перенапряжений, значения N меняются в широких пределах, то представляется целесообразным производить оценку эффекта надрезов по долговечности

$$K_{N0} = \frac{N_n}{N_{k_n}}, \quad (9)$$

где N_n , N_{k_n} — вероятностные значения циклических долговечностей гладких и надрезанных образцов при данном уровне τ .

Для анализа значений коэффициента K_{N0} выделим следующие зоны перенапряжений (рис. 1,б).

I зона — $\tau_I > \tau_{rn}$. При $\tau_{I1} = \text{const}$ $\lg K_{N01} = c_1 d_1$, $\lg K_{N02} = c_2 d_2$, $\lg K_{N03} = c_3 d_3$... Так как $\lg K_{N0} = \lg N_n - \lg N_{k_n}$, то при использовании уравнения (5) получим:

$$\lg K_{N0} = [C_n - C_{k_n}] - [m_n - m_{k_n}] \lg \tau_I. \quad (10)$$

II зона — $\tau_{rk_n} \leq \tau_I \leq \tau_{rn}$. При $\tau_{I1} = \text{const}$ $\lg K_{N01} = c_1 d_1$, $\lg K_{N02} = c_2 d_2$, $\lg K_{N03} = c_3 d_3$... Так как $\lg N_n = C_n - m_n \lg \tau_{rn}$, то

$$\lg K_{N0} = [C_n - C_{k_n} - m_n \lg \tau_{rn}] + m_{k_n} \lg \tau_I. \quad (11)$$

Значения τ_I и N_I однозначно определяются лишь на наклонном участке кривых выносливости, поэтому при определении K_{N0} следует ограничиться значениями N_n и N_{0k} (при $N_I > N_n$ K_{N0} теряет свой смысл). Граничные значения K_{N0} будут: $K_{N0}^I = \frac{N_n}{N_{0k}}$ или

$$\lg K_{N0}^I = [C_n - C_{k_n}] - [m_n \lg \tau_{rn} - m_{k_n} \lg \tau_{rk_n}]. \quad (12)$$

Связь между коэффициентами K_{N0} и $K_{\tau n}$ при значениях $\tau_I > \tau_{rn}$ можно записать следующим образом (рис. 1,б): $c_2 d_2 = c_2 d_2^* \text{ctg} \tau_k$ или $\lg K_{N0} - m_{k_n} \lg K_{\tau n}$, т. е.

$$K_{N0} = K_{\tau n}^{m_{k_n}}. \quad (13)$$

При испытаниях в коррозионной среде, цветных металлов и сплавов, когда горизонтальный участок кривых выносливости отсутствует, а также для закаленных сталей, значения K_{N0} и $K_{\tau n}$ могут быть определены только зависимостями (6) и (10).

Изменение коэффициентов K_n и K_{N0} связано с относительным расположением и размерами областей рассеяния N гладких и надрезанных образцов, которое обусловлено их размерами, геометрической

формой, материалом и видом нагружения. Если средневероятностные значения \bar{K}_z и \bar{K}_{Nz} зависят от \bar{m}_{50} и координат центров распределения $\lg z$, $\lg N$, то величина и характер изменения их дисперсий S_z^2 , S_{Nz}^2 определяются соотношением и интенсивностью изменения среднеквадратичных отклонений S_z и S_{Nz} .

Рассмотрим варианты изменения K_{z0} и K_{N0} в I зоне (табл. 1).

В большинстве случаев встречаются варианты 1 и 5. Среднеквадратичные отклонения напряжений и долговечностей могут вызвать постепенное сужение или расширение областей рассеяния K_{z0} и K_{N0} .

Во II зоне в связи со стабилизацией значений ε_{rk} и N_0 возможны изменения K_{z0} и K_{N0} только соответственно вариантам 4 и 5. Здесь наблюдается некоторое падение значений K_{z0} и уменьшение K_{N0} до

Таблица 1

№ п. п.	Расположение области рассеяния			Изменение коэффициентов K_{z0} и K_{N0}	
	признак параллельности (m)	признак равенства S_z и S_{Nz}	признак взаимного расположения		
			$\lg z$		$\lg N$
1	$m_0 \approx m_{zk}$	$S_z \approx S_{zk}$ $S_{Nz} \approx S_{Nzk}$	$\lg z > \lg z_k$	$\lg N' = \lg N_k$	$K_{z0} \approx \text{const}$, не зависит от N и $l(N)$. $K_{N0} \approx \text{const}$, не зависит от z и $l(N)$.
2	$m_0 > m_{zk}$	$S_z \approx S_{zk}$ $S_{Nz} \approx S_{Nzk}$.	.	$K_{z0} = f(N)$, не зависит от $l(N) - S_{kz} \approx 0$. $K_{N0} = f(z)$, не зависит от $l(N) - S_{kN} \approx 0$.
3	$m_0 \approx m_{zk}$	$S_z \neq S_{zk}$ $S_{Nz} = S_{Nzk}$.	.	$K_{z0} = f[l(N)]$, не зависит от $N - S_{kz} \approx \text{const}$. $K_{N0} = f[l(N)]$, не зависит от $z - S_{kN} \approx \text{const}$.
4	$m_0 > m_{zk}$	$S_z \neq S_{zk}$ $S_{Nz} = S_{Nzk}$ уменьшение пропорциональное	.	.	$K_{z0} = f[N, l(N)]$, но $S_{kz} \approx \text{const}$. $K_{N0} = f[z, l(N)]$, но $S_{kN} \approx \text{const}$.
5	$m_0 > m_{zk}$	$S_z \neq S_{zk}$ $S_{Nz} \neq S_{Nzk}$.	.	$K_{z0} = f[N, l(N)]$, $S_{kz} \approx \text{var}$. $K_{N0} = f[z, l(N)]$, $S_{kN} \approx \text{var}$.

граничных значений K_{N0} . Характер рассеяния K_{z0} и K_{N0} в этой зоне, в основном, зависит от S_z и S_{Nz} .

В III зоне величина и рассеяние K_{z0} зависят от длительных пределов выносливости ε_{rk} и ε_{rku} и их вариационных коэффициентов V_z и $V_{z,k}$.

Для сравнительной оценки коэффициентов K_{z0} и K_{N0} использованы результаты исследований [2, 3], в которых варьируются материал, конструктивные формы и вид нагружения испытываемых образцов. Сопоставляются две серии испытаний:

серия А—испытание шпоночных соединений, сталь 45 в нормализованном состоянии $\sigma_0 = 673 \text{ Мн/м}^2$, $\sigma_1 = 419 \text{ Мн/м}^2$, совместный изгиб и статическое кручение, $D=20 \text{ мм}$, $r/D=0,05$, $\varnothing 20 \text{ А/П}$, 6 ПШ₂;

серия В—испытание вылов с радиально расположенным отверстием, сталь 40Х в состоянии поставки $\sigma_0 = 740 \text{ Мн/м}^2$, $\sigma_1 = 500 \text{ Мн/м}^2$, чистый изгиб, $D=25 \text{ мм}$, $d/D=0,15$.

Статистические параметры выносливости приведены в табл. 2.

Таблица 2

Серия	$\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$	Констр. обрлцов	$\lg \bar{N}$	$\lg \bar{t}$	\bar{m}_0	S_m	S_{N_1}	$\bar{\sigma}_1$ Мн/м ²	$\lg N_0$
А	0,15	гладк.	5,3786	2,4615	10,3780	0,3745	0,0736	210,5	6,4054
		с конц. напряж.	5,6356	2,1844	3,8564	0,2966	0,0824	107,9	6,2193
В	0	гладк.	5,5645	2,5616	9,8700	1,4212	0,1836	295,0	6,4744
		с конц. напряж.	5,7200	2,4071	5,5510	0,3204	0,0651	195,0	6,2212

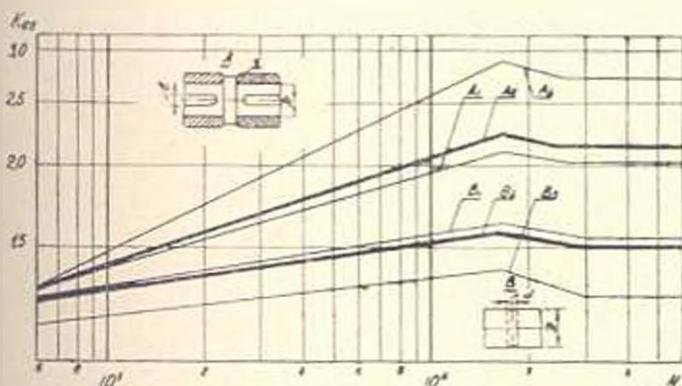


Рис. 2. Изменение $K_{\sigma\sigma}$ в зависимости от N и $t(N)$ для серии испытаний А и В (здесь и на остальных рисунках линии A_1 , A_2 , A_3 и B_1 , B_2 , B_3 соответствуют $f(N)$ 10%, 50% и 99,9%)

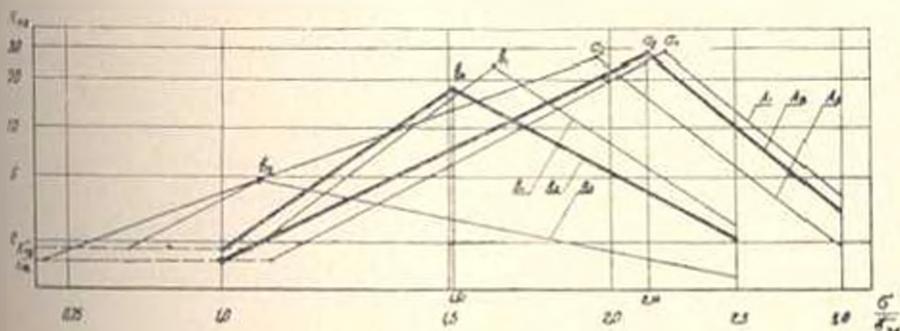


Рис. 3. Изменение $K_{\sigma\sigma}$ в зависимости от σ_1/σ_0 и $f(N)$

На рис. 2 и 3 представлены зависимости $K_{\Sigma} = f[\sigma, I(N)]$ и $K_{\Sigma} = f[\sigma, I(N)]$; для удобства сопоставления последняя дана в координатах $\lg K_{\Sigma} - \lg \frac{\sigma}{\sigma_{FK}}$. Как видно, с усилением концентрации напряжений области рассеяния K_{Σ} расширяются, увеличиваются K_{Σ} и происходит интенсивное изменение их величин.

Для серии А характерно сравнительное узкое поле рассеяния σ для гладких образцов и широкое поле σ для шпоночных соединений. Это является следствием влияния статических касательных напряжений на показатели рассеяния σ для первых и одновременного воздействия нескольких факторов (отклонения посадочных размеров соединения, механических свойства материала вала и втулки, особенностей распределения крутящего момента по длине шпопки и посадочной поверхности и т. п.) — для вторых. Поэтому при испытаниях соединений на всех уровнях долговечности наблюдается неравенство $S_{\Sigma} < S_{\Sigma h}$. Это приводит к тому, что при $I(N)_1 > I(N)_2$, $K_{\Sigma 1} > K_{\Sigma 2}$; величина и переменность дисперсии S_{Σ}^2 также значительны.

Для режима нагружения в конструктивных формах образцов серии В наблюдается обратная картина: здесь рассеяние σ для гладких образцов больше, чем для надрезанных, что объясняется заранее фиксированным местом разрушения (в зоне надреза) последних, приводящим к снижению показателей рассеяния σ . В этом случае $S_{\Sigma} > S_{\Sigma h}$, поэтому при $I(N)_1 > I(N)_2$, $K_{\Sigma 1} < K_{\Sigma 2}$. Изменение значений K_{Σ} и его дисперсии S_{Σ}^2 по всему интервалу долговечностей, по сравнению с серией А, происходит плавно.

Зависимость $K_{\Sigma} = f[\sigma, I(N)]$ имеет возрастающе-убывающий характер с максимальным значением $K_{\Sigma \max}$, соответствующим σ_{FK} (рис. 3, точки $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$); снизу она ограничена значением K_{Σ}^* , которое является постоянным для данной серии испытаний. Достижение значений $K_{\Sigma \max}$ и K_{Σ}^* происходит при разных уровнях перенапряжений σ/σ_{FK} . При острых концентраторах напряжений (серия А) K_{Σ} значительны и охватывают сравнительно большой интервал σ/σ_{FK} . При этом, в I зоне изменение K_{Σ} протекает интенсивнее, с более высоких уровней σ/σ_{FK} , но протяженность этой зоны, по сравнению с аналогичной для серии В, меньше.

На формирование поля разброса K_{Σ} в I зоне преобладающее влияние оказывают показатели рассеяния N гладких образцов, поэтому для серии А характерно узкое поле K_{Σ} с плавным изменением его дисперсии $S_{K_{\Sigma}}$, а для серии В — широкое поле K_{Σ} со значительной переменностью $S_{K_{\Sigma}}^2$. В связи с этим значения $K_{\Sigma \max}$ для серии А стабильны и распределены плотно, тогда как для серии В они изменяются в широких пределах и имеют большой разброс по уровням σ/σ_{FK} .

Для обеих серий в I зоне с увеличением $I(N)$ значения K_{Σ} падают, т. к. на высоких уровнях σ/σ_{FK} в подавляющем большинстве

случаев $S_N > S_{N_0}$. В зоне II, в связи с постоянством значения N_0 , разброс K_{N_0} , в основном, зависит от показателей рассеяния N надрезанных образцов. Поэтому для серии А наблюдается широкое поле K_{N_0} со значительным разбросом K_N^1 по нижним уровням перенапряжений. Дисперсия $S_{N_0}^2$ также переменна. В этой зоне при $I(N)_1 > I(N)_2$ $K_{N_0} < K_{N_0}$.

Значительное рассеяние коэффициентов K_{N_0} и K_{N_0} характерны для циклических испытаний, для которых расхождения между среднеквадратичными отклонениями S_1 , S_N и S_{N_0} , S_{N_0} значительны (испытание соединений). В связи с тем, что наблюдаемые в машиностроении случаи усталостного разрушения большей частью относятся к соединениям, вероятностный подход к коэффициентам K_{N_0} и K_{N_0} уточняет расчеты на прочность, долговечность и представляет определенный практический интерес.

ЕрIII им. К. Маркса

Поступило 11.1.1973.

И. Ф. АСАДЯН, И. Д. ЯСАДЯН, И. Г. МАН

ԲԻՆՆԿԱՏՈՒԹՅԱՆ ԱՏԱՅԻՆԱՐ ՌԵԺԻՐ ԳԵՊԸՈՒՄ ԸԱՐՈՒՄՆԵՐԻ
ԿՈՆՏՆՏՐԱՅԻՆՈՒՄ ԷՖԵԿՏԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄ ԵՆՈՒՋԸ

Ա մ փ ո փ ո մ

Չույց է արվում, որ լարամանրի կոնցենտրացիայի էֆեկտիվ K_{N_0} գործակիցները հանգրվանում են համանուն մեծություններ, որոնք կախված են չիկլերի N թվից և չբոյցարկելու $I(N)$ հավանականությունից: Լարամանրի կոնցենտրացիայի առկայության դեպքում ցիկլիկ երկարակեցություն նվազումը գնահատվում է K_{N_0} գործակիցով, որն իրենից ներկայացնում է սղորկ և կոնցենտրատորով փորձանմուշների N մեծությունների հարաբերությունը: K_{N_0} և K_{N_0} որոշման համար առաջարկվում են բանաձևեր:

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 Шашин М. Я. Об оценке рассеивания значений циклической прочности. «Вестник машиностроения», № 2, 1965.
- 2 Ман С. Л., Гаспарян С. А., Стакман М. Г. Исследование циклической прочности шпандочных соединений. Сб. «Материалы юбилейной научно-технической конференции, посвященной 50-летию ОИИ. Машиностроение и экономика», Одесса, изд. ОИИ, 1968.
- 3 Олейник Н. В., Сильвинский Н. А. Циклическая прочность и долговечность валов. Сб. «Надежность и долговечность машин и приборов», вып. 3, М., изд. ИИИМАИИ, 1966.