

УДК 621.81.002.22

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ, УЧИТЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Канд. техн. наук, доц. ЧИБУХЧЯН С. С., докт. техн. наук, проф. СТАКЯН М. Г.

Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван

E-mail: armenpack@mail.ru

CALCULATION METHODOLOGY FOR COEFFICIENTS TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF FACTORS ON ENDURANCE STRENGTH OF MACHINE COMPONENTS

TCHIBUKHCHIAN S. S., STAKIAN M. G.

State Engineering University of Armenia (Politechnic), Yerevan

Предложены расчетные схемы и получены зависимости для определения коэффициентов прочности и долговечности в широком интервале многоциклового усталости для деталей, работающих на воздухе и в коррозионных средах. Изучено изменение этих коэффициентов в зависимости от действия различных факторов в вероятностном аспекте. Составлен расчетный алгоритм.

Ключевые слова: сопротивление усталости, коэффициенты прочности и долговечности, расчетный алгоритм.

Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 3 назв.

The paper presents design schemes and dependences for determination of strength and durability coefficients within a wide range of high-cycle fatigue for the components operating in the out-of-doors and corrosive environment. Variations of these coefficients due to the action of various factors have been studied in the probability aspect. A design algorithm has been compiled in the paper.

Keywords: endurance strength, strength and durability coefficients, design algorithm.

Fig. 2. Tab. 3. Ref.: 3 titles.

Введение. Большое разнообразие и разнохарактерное действие многочисленных факторов, влияющих на процесс накопления циклических повреждений и приводящих к усталостному разрушению тяжелонагруженных и ответственных деталей машин, в свое время привели к созданию методики расчетов, в основу которой положен принцип дифференциации влияния и оценки каждого из действующих факторов [1]. Если данный подход обеспечивал необходимую точность расчетов для единичных факторов, то рассмотрение их совместных действий как независимых событий может привести к необоснованному завышению запасов прочности, следовательно, – к увеличению материалоемкости конструкции.

В связи с этим необходимо разработать новую методику, которая позволит комплексно учитывать влияние факторов конструктивного, материаловедческого, технологического и эксплуатационного характера. Таковой является методика сравнения областей рассеяния циклических долговечностей деталей при их сравнительных испытаниях на усталость. Так как все

коэффициенты, количественно учитывающие влияние указанных факторов, – это отношения пределов выносливости, то сами коэффициенты являются случайными функциями, параметры которых можно получить совместным решением уравнений квантильных линий усталости при сравнительных испытаниях [2].

Методика расчета. Структура коэффициентов, используемых для учета различных факторов, влияющих на сопротивление усталости деталей и узлов машин, указывает на преобладающее использование расчетов по критерию прочности. Но при проектировании деталей и элементов конструкций, к которым предъявляются ограничения по сроку службы, требования обеспечения минимальной массы или установления остаточного ресурса при наличии трещин (авиа-, судо- и ракетостроение, транспортные средства, морские и речные сооружения и др.), основными являются вероятностные расчеты на долговечность, ставшие в последнее время первостепенными и преобладающими при проектировании машин. Поэтому учет влияния действующих факторов в этих расчетах целесооб-

разно вести по коэффициентам относительной долговечности (K_{dN} , K_{FN} , K_{vN} , K_{KN}), аналогичным по структуре K_N в [3]. Кроме того, для кривых усталости с высокими показателями наклона ($m = 25-40$), свойственными упрочненным деталям или второму наклонному участку кривой коррозионной усталости, изменение уровня напряжений σ на 5–7 % вызывает вариацию долговечности на 1–2 порядка, которое не может быть учтено структурой коэффициентов согласно [3].

Учитывая, что при $N = \text{const}$ и $\sigma = \text{const}$ (рис. 1) $\lg \sigma_{RN} = C/m - (1/m)\lg \sigma$ и $\lg N = C - m\lg \sigma$, а согласно [3] $\lg K_\sigma = \lg \sigma_{RN} - \lg \sigma_{RNf}$ и $\lg K_N = = \lg N - \lg N_f$, совместным решением уравнений семейств кривых усталости для сравнительных испытаний получим функции:

$$K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{F\sigma}, K_{v\sigma}, K_{K\sigma} = F_\sigma(N, z_p); \quad (1)$$

$$K_{dN}, K_N, K_{FN}, K_{vN}, K_{KN} = F_N(\sigma, z_p). \quad (2)$$

Аналогично кривым усталости, семейства функций (1), (2) имеют двух- или трехзвенный

вид. При $N_{Gf} \geq N_G$ и $\sigma_{RNf} \geq \sigma_{RN}$ наметим зоны долговечностей и напряжений, в пределах которых вид функций (1), (2) остается неизменным (рис. 1):

- I: $N < N_{Gf}$ ($N < N_G$); $\sigma > \sigma_{Rf}$ ($\sigma > \sigma_R$);
- II: $N_{Gf} \leq N \leq N_G$ ($N_G \leq N \leq N_{Gf}$);
 $\sigma_{Rf} \geq \sigma \geq \sigma_R$ ($\sigma_R \geq \sigma \geq \sigma_{Rf}$);
- III: $N > N_G$ ($N > N_{Gf}$); $\sigma < \sigma_R$ ($\sigma < \sigma_{Rf}$).

Аналогично можно записать и для рис. 2, заменив f в индексах параметров N и σ на k .

Ввиду разнообразия сочетаний зон долговечностей и напряжений, вытекающего из взаимного расположения областей рассеяния $\lg N$ для сравнительных испытаний, можно выделить следующие расчетные схемы [3], которые включают в себя два (№ 1, рис. 1) или четыре (№ 2, рис. 2) варианта расчетных процедур. Математическая и графическая интерпретации этих процедур представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2, которые фактически являются номограммами для оценки сопротивления усталости тяжело нагруженных и ответственных деталей машин.

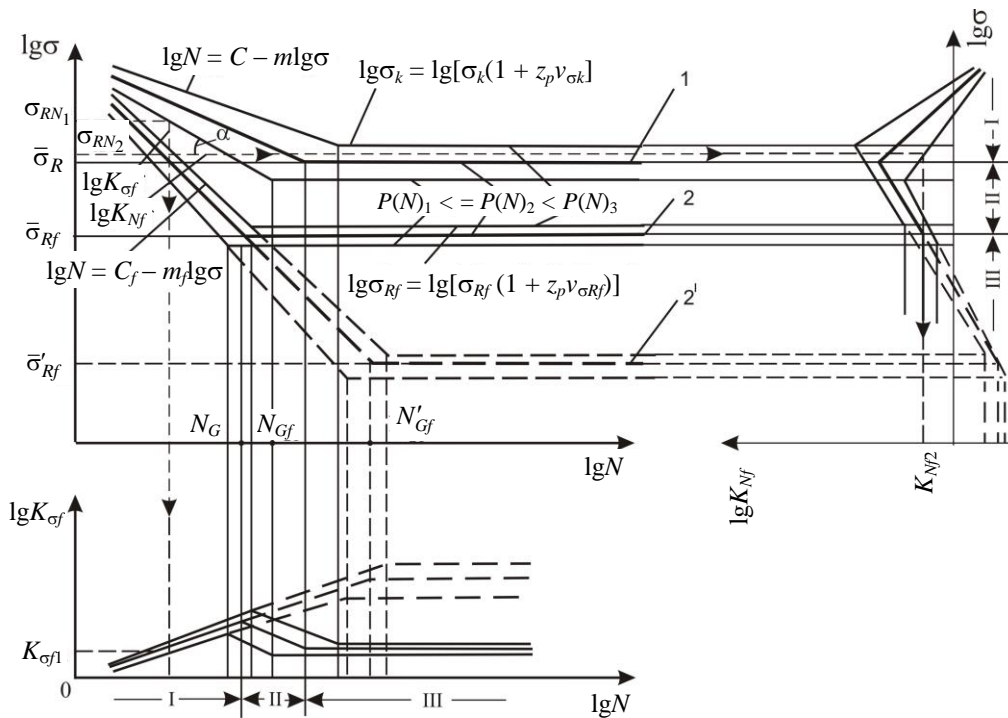


Рис. 1. К определению зависимостей $K_{\sigma f} = f_1(N, z_p)$ и $K_{Nf} = \varphi_1(\sigma, z_p)$ (расчетная схема № 1): I–III – зоны N и σ ; 1, 2 и 2' – семейства квантильных линий усталости для образцов: исходного и с изучаемым фактором при $N_G > N_{Gf}$ и $N_G < N_{Gf}$

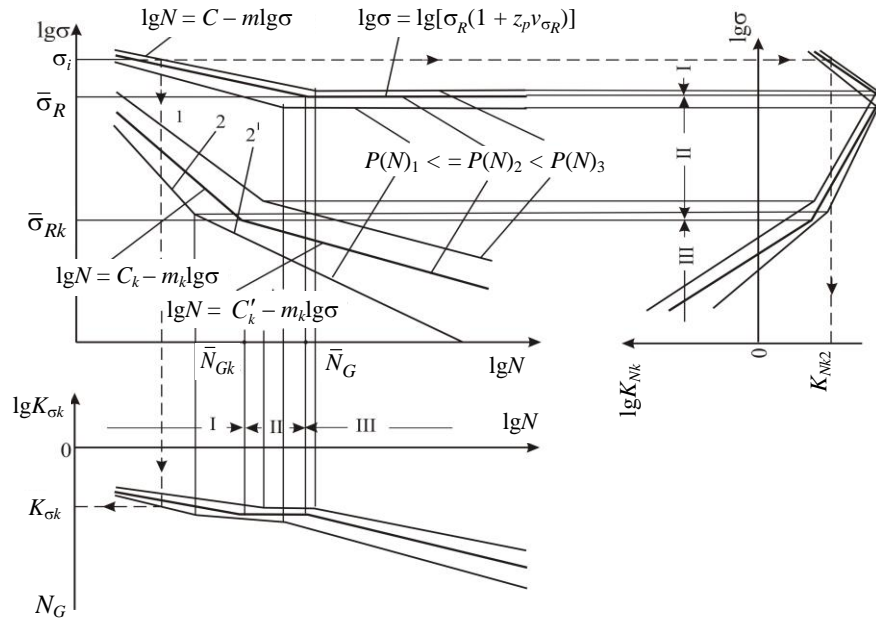


Рис. 2. К определению зависимостей $K_{\sigma k} = f_2(N, z_p)$ и $K_{Nk} = \varphi_2(\sigma, z_p)$ (расчетная схема № 2):
 I–III – зоны N и σ ; 1, 2 и 2' – семейства квантильных линий усталости для образцов, испытанных на воздухе и в коррозионной среде при $N_G > N_{Gk}$

Структура зависимостей (табл. 1) для определения коэффициентов (1) и (2), несмотря на некоторые различия, имеет общие закономерности. В них параметры S и ΔC характеризуют

уровень, а M и Δm – интенсивность воздействия изучаемого фактора на показатели сопротивления усталости.

Таблица 1

Зависимости $K_{\sigma f}, K_{\sigma k} = f_{1,2}(N, z_p)$ и $K_{Nf}, K_{Nk} = \varphi_{1,2}(\sigma, z_p)$

Зона		Расчетная схема	
		№ 1	№ 2
N	1	$\lg K_{\sigma f} = S_1 - M_1 \lg N$	$\lg K_{\sigma k} = S_1 - M_1 \lg N$
	2	$\lg K_{\sigma f} = S_2 - M_2 \lg N$ (или $S_2' - M_2' \lg N$)	$\lg K_{\sigma k} = S_1' - M_1' \lg N$ (или $S_2 - M_2 \lg N$)
	3	$\lg K_{\sigma f} = S_1 - \Delta(\lg N_G/m) = \text{const}$	$\lg K_{\sigma k} = S_2' - M_2' \lg N$
σ	1	$\lg K_{Nf} = \Delta C_1 - \Delta m \lg \sigma$	$\lg K_{Nk} = \Delta C_1 - \Delta m \lg \sigma$
	2	$\lg K_{Nf} = \Delta C_2 - m_f \lg \sigma$	$\lg K_{Nk} = C_2 - m_k \lg \sigma$
	3	$\lg K_{Nf} = \Delta C_1 - \Delta(m \lg \sigma_R) = \text{const}$	$\lg K_{Nk} = \Delta C_2' - m_k' \lg \sigma$

В табл. 1:

$$\left. \begin{aligned}
 S_1 &= \pm(C/m - C_f/m_f); & S_1' &= \pm(C/m - C_k'/m_k'); \\
 S_2 &= S_1 + (\lg N_G)/m; & S_2' &= S_1' + (\lg N_G)/m; \\
 M_1 &= \pm(1/m - 1/m_f); & M_1' &= \pm(1/m - 1/m_k'); & M_2 &= 1/m; & M_2' &= 1/m_k'; \\
 \Delta(\lg N_G/m) &= \pm[(\lg N_G/m) - (\lg N_{Gf})/m_f]; \\
 \Delta C_1 &= \pm(C - C_f); & \Delta C_1' &= C_k' - C; & \Delta C_2 &= \Delta C_1 - m \lg \sigma_R; & \Delta C_2' &= \Delta C_1' + m \lg \sigma_R; \\
 \Delta m &= \pm(m - m_f); & \Delta(m \lg \sigma_R) &= \pm(m_f \lg \sigma_{Rf} - m \lg \sigma_R),
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где знаки «±» соответствуют случаям $\sigma_{RN} \geq \sigma_{RNf}$ и $\sigma_{RN} \geq \sigma_{Rk}$; для расчетной схемы № 2 в индексах параметров (4) в место f указывают k .

Виды функций $K_{cf}, K_{ck} = f_{1,2}(N, z_p)$ и $K_{Nf}, K_{Nk} = \varphi_{1,2}(\sigma, z_p)$ формируются соотношениями параметров уравнений кривых усталости для сравнительных испытаний. Выделим группу относительных величин, учитывающих изменения этих параметров в связи с действием изучаемого фактора (расчетная схема № 1):

$$\left. \begin{aligned} \delta_\sigma &= \sigma_R / \sigma_{Rf}; \quad \delta_N = N_G / N_{Gf}; \quad \delta = m / m_f; \\ \delta_c &= C / C_f; \quad \delta_b = (C/m) : (C_f / m_f) = \delta_c / \delta_m; \\ \delta_{s^2\sigma} &= s_{\sigma i}^2 / s_{\sigma f}^2; \quad \delta_{s^2N} = s_{Ni}^2 / s_{Nf}^2; \quad \delta_{\lg N} = \overline{\lg N} / \overline{\lg N_f}; \\ \delta_{\lg \sigma} &= \overline{\lg \sigma} / \overline{\lg \sigma_f}. \end{aligned} \right\} (5)$$

Аналогично для расчетной схемы № 2 в системе (5) в индексах f заменяют на k .

Каждая из этих величин формирует отдельные свойства изменений функций K_{cf}, K_{ck} и

K_{Nf}, K_{Nk} : δ_σ и δ_N определяют размеры зон I, II, III; δ_m, δ_c и δ_b характеризуют изменения K_{cf}, K_{ck} и K_{Nf}, K_{Nk} внутри зон (интенсивность и уровень); $\delta_{\lg N}$ и $\delta_{\lg \sigma}$ – изменения средневероятных функций $\overline{K}_{cf}, \overline{K}_{ck}$ и $\overline{K}_{Nf}, \overline{K}_{Nk}$, а $\delta_{s^2\sigma}$ и δ_{s^2N} – характер рассеяния этих величин. В этой связи рассмотрим общие закономерности изменения указанных функций (табл. 2, 3).

Учитывая структуру коэффициентов K_{cf} и K_{Nf} , которые получены из соотношения уравнений кривых усталости, описываемых единой формой (гиперболической зависимостью порядка m), в системе координат $\lg \sigma - \lg N$ они взаимосвязаны: $\lg K_{cf} = a \lg K_{Nf}$, где $a = \arctg m$ (рис. 1), т. е. $K_{Nf} = K_{cf}^m$. Аналогичные связи получают и для коэффициентов K_{ck} и K_{Nk} .

Таблица 2

Варианты видов функций $K_{cf} = f_1(N, z_p)$ и $K_{Nf} = \varphi_1(\sigma, z_p)$

Группа	δ_N, δ_σ	Подгруппа δ_σ			δ_m	δ_b	$K_{cf} = f_1(N, z_p)$	$K_{Nf} = \varphi_1(\sigma, z_p)$
		A	Б	В				
1	>1				>1	>1		
2					≈1	≥1		
3					<1	<1		
4	≈1	>1	≈1	<1	>1	≤1		
5					≈1	≥1		
6					<1	>1		
7	<1				>1	>1		
8					≈1	≥1		
9					<1	<1		

Таблица 3

Варианты видов функций $K_{\sigma k} = f_2(N, z_p)$ и $K_{Nk} = \varphi_2(\sigma, z_p)$

N	δ_{NG}	δ_m°	δ_c°	$K_{\sigma k} = f_2(N, z_p)$	$K_{Nk} = \varphi_2(\sigma, z_p)$
1 2 3	<1	<1 ≈ 1 >1	<1 <1 ≥ 1		
4 5 6	<1 ≈ 1 >1	<1 ≈ 1 >1	<1 <1 ≥ 1		
7 8 9	<1 >1 >1	<1 ≈ 1 >1	<1 <1 ≥ 1		

Это и предопределяет идентичность форм и изменений их квантильных линий, которая также вытекает из геометрических построений на рис. 1, 2.

Основными величинами, формирующими вид функций, являются δ_{σ} и δ_N (табл. 2, 3). Можно выделить три основные партии для $K_{\sigma f}$, K_{Nf} и $K_{\sigma k}$, K_{Nk} – это случаи, когда δ_N , $\delta_{\sigma} > 1$ ($\approx 1, < 1$). При δ_N , $\delta_{\sigma} \approx 1$ зона II отсутствует. Внутри каждой из этих партий существуют три группы, в которые включены подгруппы А, Б и В и в рамках которых формируются значения коэффициентов $K_{\sigma f}$, K_{Nf} и $K_{\sigma k}$, K_{Nk} . Всего возможны 27 вариантов видов

функций $K_{\sigma f}$, $K_{\sigma k} = f_{1,2}(N, z_p)$ и K_{Nf} , $K_{Nk} = \varphi_{1,2}(\sigma, z_p)$. Величина δ_m влияет на интенсивность изменения квантильных линий в зонах I и II, а δ_b – на начальный уровень значений $K_{\sigma f}$, $K_{\sigma k}$ и K_{Nf} , K_{Nk} .

Сравнительная простота расчетных процедур и удобная систематизация возможных вариантов позволяют разработать следующий вычислительный алгоритм, обобщающий весь комплекс вычислений. Первоначально выбирают расчетную схему, вводят двумерные «массивы» данных (N_i, σ_i) $i = \overline{1, n}$ и значения $\bar{\sigma}_R, \bar{\sigma}_{Rf}, \bar{\sigma}_{Rk}, \nu_{\sigma R}, \nu_{\sigma Rf}, \nu_{\sigma Rk}$ для исходной и сопоставимой серий испытаний.

Для наклонных участков кривых усталости составляют двумерные корреляционные таблицы (для расчетной схемы № 1 – две, а для № 2 – три), по которым определяют статистики уравнений (4)–(8) в [3]. Проверяют значимость выборочных коэффициентов корреляции r , а также параметров $\overline{\lg N}$, \overline{m} и \overline{C} по критериям Спирмена, Фишера и Стьюдента. При удовлетворении перечисленных условий вычисляют 90%-е доверительные интервалы этих параметров, а также вероятные значения m , C , σ_R , N_G для квантильных линий усталости при: $z_p = 1,28; 0; -1,28; -1,64; -2,33$ и $-3,09$ ($P(N) = 0,1; 0,5; 0,9; 0,95; 0,99$ и $0,999$). Проверяют условия $N_G \geq N_{Gf}$ и $\sigma_{RN} \geq \sigma_{RNf}$, σ_{RNk} , уточняют код варианта расчетных процедур и рассчитывают параметры функций (1), (2) для заданного ряда z_p . С целью графического построения функций и использования их в уточненных расчетах вычисляют наиболее характерные значения коэффициентов:

- а) для расчетной схемы № 1 – значения $K_{\sigma j}$ при $N = 10^5, 10^6, N_G, N_{Gf}$, а величины K_{Nf} при $\sigma = 1,25\sigma_R, \sigma_R, \sigma_{Rf}$;
- б) для расчетной схемы № 2 – значения $K_{\sigma k}$ при $N = 10^5, 10^6, N_G, N_{Gk}, 10^7, 10^8$, а величины K_{Nk} при $\sigma = 1,25\sigma_R, \sigma_{Rk}, 0,75\sigma_{Rk}$.

ВЫВОД

Предложенный метод позволяет в реальном диапазоне N и σ вести системный анализ и количественный учет влияния разнородных по характеру воздействия факторов, группируя их по степени повреждающего или упрочняющего эффекта, который, в конечном итоге, интегрально проявляется в изменении расположения семейств квантильных линий усталости для сравнительных испытаний. Доступность рас-

четного алгоритма и применение в нем общеизвестных статистических параметров двумерной задачи облегчают его использование в уточненных расчетах на прочность и долговечность с использованием вероятностных значений показателей сопротивления усталости. Метод пригоден также для сравнительного анализа и выбора оптимальных конструкторских, технологических и эксплуатационных параметров с целью повышения сопротивления усталости ответственных и тяжело нагруженных деталей машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев: Наук. думка, 1987. – Ч. 1. – 505 с.; Ч. 2. – 103 с.
2. Стакян, М. Г. Программное обеспечение расчетов сопротивления усталости деталей, работающих на воздухе и в коррозионных средах / М. Г. Стакян // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1997. – Т. 50, № 1. – С. 3–10.
3. Чибухчян, С. С. Вероятностная оценка показателей сопротивления коррозионной усталости валов и их соединений / С. С. Чибухчян, М. Г. Стакян // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 3. – С. 38–40.

REFERENCES

1. Troschenko, V. T., & Sosnovsky, L. A. (1987) *Endurance Strength of Metals and Alloys: Reference Book*. Kiev: Naukova Dumka [Scientific Idea].
2. Stakian, M. G. (1997) Software for Calculating Endurance Strength of Components Operating in the Out-of-Doors and Corrosive Environment. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk respubliki Armeniya i Gosudarstvennogo inzhenernogo universiteta. Ser. Tehnicheskikh nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia and the State Engineering University. Ser. technical Sciences]*, 50 (1), 3–10.
3. Tchibukhchian, S. S. (2013) Probabilistic Assessment of Indices for Shaft Corrosion Fatigue Resistance and Their Connections. *Traktory i Selkhozmachiny [Tractors and Agricultural Machinery]*, 3, 38–40.

Поступила 25.03.2013