

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. Г. СТАКЯН, Н. С. ИСАХАНЯН

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
ШПОНОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Одним из основных направлений снижения материалоемкости машин является уточнение и совершенствование методов расчета их узлов и деталей, режим нагружения и механические характеристики которых носят стохастический характер и, в основном, подчиняются нормальному закону распределения. Это позволяет в структуру традиционных методов расчета ввести статистические параметры выносливости и производные от них величины, т. к. использование одних осредненных значений приводит к неконтролируемому разбросу и, в большинстве, завышению запасов прочности и долговечности, что в условиях крупносерийного и массового производства может стать помехой на пути увеличения объема машиностроительной продукции.

На основе теории подобия усталостного разрушения [1] разработана методика определения максимальных напряжений в связи с масштабным эффектом и концентрацией напряжений. Показана возможность применения этой теории и для сложного нагружения [2, 3]. Накоплены данные об особенностях изменения вариационных коэффициентов пределов выносливости и дана вероятностная трактовка эффективного коэффициента концентрации напряжений K_e [4].

Это предусматривает также применение вероятностных методов и при оценке долговечности конструкции, особенности которой вытекают из природы усталостного разрушения материалов, описываемой зависимостью $\sigma^m N = C$. Если учесть, что в тяжело нагруженных узлах чаще всего применяют высокопрочные и термообработанные до высокой твердости материалы, для которых $m = 15 \dots 30$, то незначительные колебания циклических перенапряжений могут вызвать вариацию средневероятных значений долговечности на 1—2 порядка. Переменны также показатели рассеяния долговечности, которые на уровне длительных пределов выносливости, представляющий практический интерес, значительны, в связи с чем вероятностная оценка долговечности становится необходимым условием для проведения уточненных расчетов. Поэтому в [4] предложен коэффициент K_{σ} в виде отношения циклических долговечностей образцов гладких и с концентратором напряжений, который с вероятностных позиций учитывает чувствительность к

перенапряжениям, а также влияние реальных форм и размеров на долговечность.

Рассматривается прочность и долговечность соединения типа «вил-ступица» — шпоночного, особенность конструкции и сложность напряженного состояния которого заключается в том, что в его опасном сечении могут взаимодействовать разнородные концентраторы напряжений — галтель, шпоночный паз и посадка. Напряженно-деформированное состояние и характер разрушения каждого из них подробно изучены [5]. Менее изучен вопрос взаимодействия и степени воздействия каждого концентратора в суммарном эффекте циклического повреждения, поэтому в отличие от традиционного дифференциального метода в данной работе представлены результаты комплексного исследования шпоночного соединения в целом.

Циклические испытания приближены к реальным условиям работы соединения — совместное действие изгиба и кручение, характерное для валов передаточных механизмов; распределение крутящего момента между посадкой и шпоной при передаче его через соединение; наличие фреттинг-коррозии в соединении; вариация посадочных размеров в пределах допусков, что меняет действительный натяг и фактическую способность соединения, перераспределяет крутящий момент и степень повреждения контактирующих поверхностей; вариация расположения концентраторов, что меняет степень их взаимодействия; наличие других неконтролируемых факторов, связанных с неидентичностью состояний контактирующих поверхностей и имеющих место в реальных конструкциях.

Суммарное воздействие указанных факторов при неблагоприятном их сочетании может привести не только к значительному изменению долговечности, но и разбросу показателей прочности соединения в большей степени, чем для лабораторных образцов упрощенной конструкции, по результатам испытаний которых составлены справочные таблицы [5].

Использованы результаты циклических испытаний шпоночных соединений при совместном циклическом изгибе и статическом кручении ($\frac{\sigma}{\sigma_s} = 0,45$) [6]. Конструкции образцов из стали 45 (нормализация: $HV = 190$, $\sigma_n = 673 \text{ МПа}$, $\sigma_t = 419 \text{ МПа}$, $\tau_t = 253 \text{ МПа}$) представлены на рис. 1. Всего проведено 7 серий испытаний гладких (А), с галтелью (Б), гладких шпоночных образцов (В) и шпоночных соединений (Г) при варьируемом расстоянии между галтелью и шпоночным пазом: Г1 — $b = -1,5 \text{ мм}$; Г2 — $b = 1,5 \text{ мм}$; Г3 — $b = 2 \text{ мм}$; Г4 — $b = 4 \text{ мм}$. Фотоупругими измерениями и данными других авторов определены сечения действия максимальных напряжений для галтели $\frac{D}{d} = 1,5$, $\frac{r}{d} = 0,1$, $d = 20 \text{ мм}$, шпоночного паза $b_w = 6 \text{ мм}$, $\frac{r}{d} = 0,005$ и посадки $\varnothing 20 \frac{H7}{j6}$. Для максимально возможного сни-

жения прочности, а также определения границ, исключая взаимное влияние концентраторов, опасные сечения всех видов совмещены, а затем изменено расположение шпоночного пазы относительно двух остальных концентраторов.

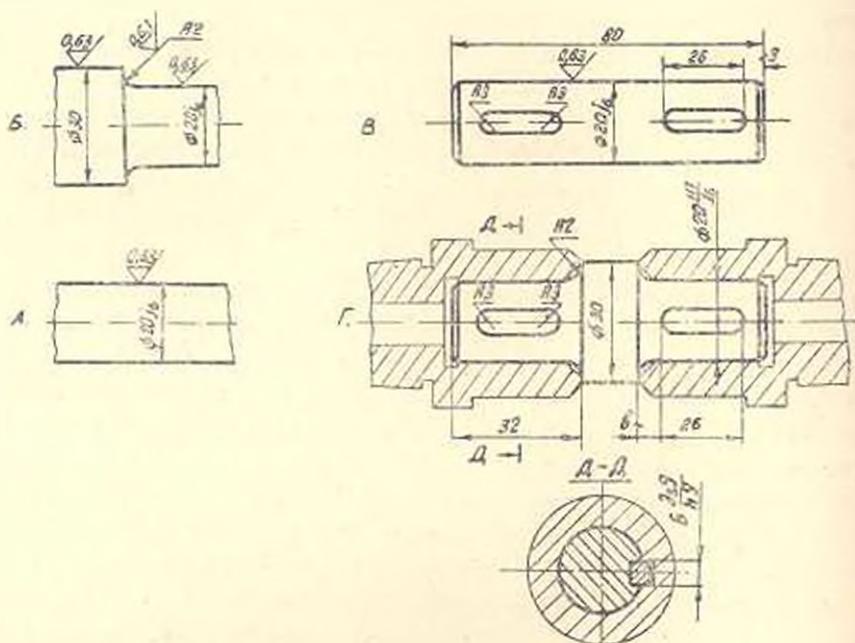


Рис 1 Конструкции образцов

Коэффициенты K_i и K'_N , характеризующие прочность и долговечность соединения, являются случайными функциями от N_i и σ_i и их изменение в большинстве носит возрастающе-убывающий характер. При использовании уравнений кривых выносливости в параметрическом виде

$$\lg N_i = (\overline{\lg N} + u \cdot S_N) - (\overline{m} + u \cdot S_m) (\lg \sigma_i - \lg \sigma) = C - m \lg \sigma_i$$

для нижеуказанных зон N_i и σ_i получены зависимости [4]:

$$I - N_i < N_{ок} (N_i < N_o),$$

$$\lg K_o = S_1 + M_1 \lg N_i;$$

$$II - N_{ок} < N_i < N_o (N_o < N_i < N_{ок}),$$

$$\lg K_o = S_2 + M_2 \lg N_i; \quad (2)$$

$$III - N_i > N_o (N_i > N_{ок}).$$

$$\lg K_o = \text{const} = \lg \sigma_r - \lg \sigma_{rA}$$

и

$$I - \sigma_i > \sigma_r;$$

$$\lg K_N = \Delta C_1 + \Delta m \lg \sigma_i;$$

$$II - \sigma_{rA} < \sigma_i < \sigma_r,$$

$$\lg K_N = \Delta C_2 + m_2 \lg \sigma_i; \quad (3)$$

$$III - \sigma_i < \sigma_{rA},$$

$$\lg K_N = \text{const} = \lg N_o - \lg N_{ок}.$$

На рис. 2 представлены рассчитанные по (2)-(3) значения K_i и K'_N для вероятностей неразрушения $I(N) = 10, 50$ и 99.9% (для удобства значения K'_N даны в полулогарифмических координатах).

В связи с малой протяженностью II зоны долговечностей ($N_{02} > N_{01}$) максимальные значения K_{max} близки или вовсе равны таковым для области длительной выносливости и поэтому представляют наибольший интерес для оценки прочности. Как видно из рис. 2а, максималь-

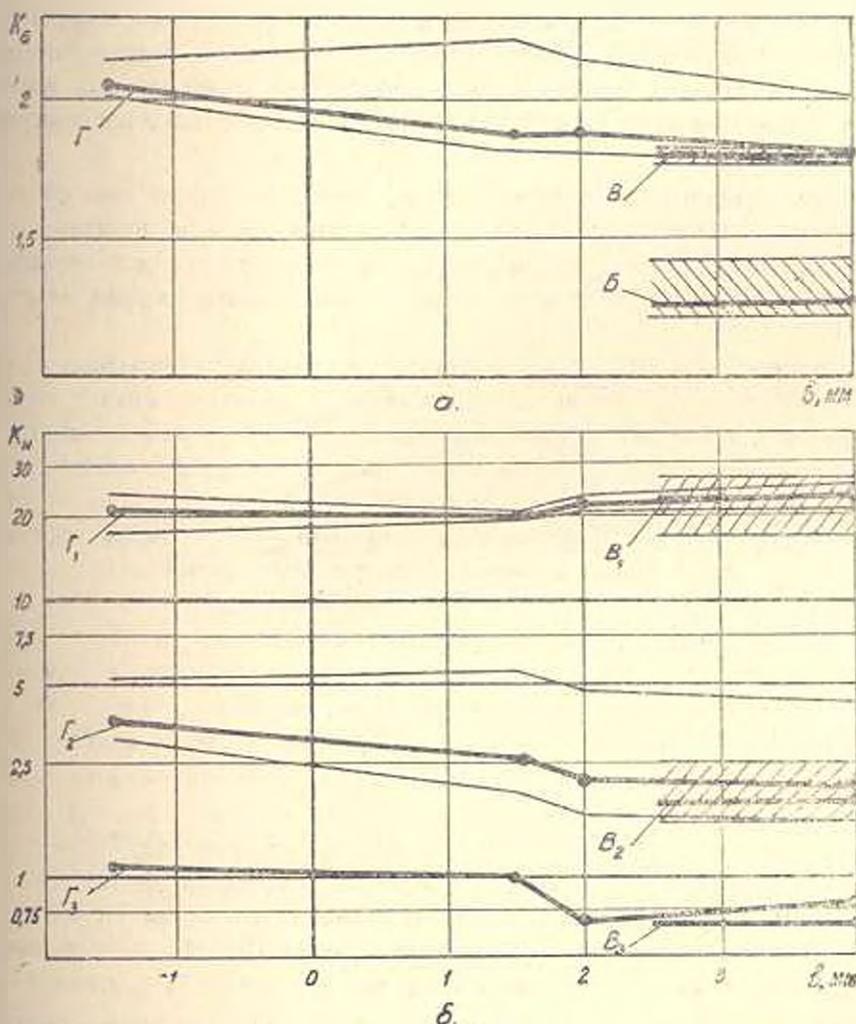


Рис. 2 Области рассеяния коэффициентов K_{σ} и K_N : а) значения m_{σ} при $N_0 = 5 \cdot 10^6$ (Б — галтель, В — гладкие шпоночные образцы, Г — шпоночное соединение); б) значения K_N на уровне: σ_r (максимальные значения K_N^r — B_1, Γ_1 ; $\sigma_1 = 150 \text{ МПа}$ — B_2, Γ_2 (граничные значения K_N^r — B_3, Γ_3).

Обозначения областей Г и В аналогичны рис. 2а.

ное снижение циклической прочности имеет место при совмещении опасных сечений всех трех концентраторов. При этом преобладающее влияние оказывает посадка, т. к. зарождение усталостных микротрещин в начальный период происходит по всему периметру контакта вала со ступицей от фреттинг-коррозии, а затем — по острым краям шпоночной канавки, в местах перехода ее криволинейного участка к пря-

молинейному. Влияние же шпоночной канавки и галтели происходит в процессе избирательного развития микротрещин и проявляется в изменении параметров выносливости образцов серии Г. Наличие в соединении острого концентратора (посадки), повреждающее действие которого отличается от остальных, «сглаживает» суммарный эффект действия остальных и при выводе шпоночной канавки из зоны максимальной напряженности наблюдается слабое, но монотонное снижение K_u до аналогичных значений для серии В, которая является контрольной.

Средневероятные значения K_u на 20—25% выше аналогичных справочных данных, полученных для соединений при испытании их циклическим изгибом, что является следствием усиления напряженности наиболее опасных поверхностных слоев при совместном действии $\pm \sigma$ и τ .

Синхронное и совокупное действие нескольких разнородных факторов, сопутствующих процессы зарождения и развития микротрещин в соединении, приводит к увеличению показателей рассеяния долговечности образцов серии Г относительно гладких (серия А), поэтому с повышением $I(N)$ значения K_u для соединений растут. Разброс K_u относительно средневероятных значений при $I(N) = 10 \dots 99,9\%$ составляет — 4,5 ... 18,4% (вариационный коэффициент меняется в пределах $v_{K_u} = 0,6 \dots 4,4\%$).

Степень концентрации напряжений определяет взаимное расположение областей рассеяния долговечностей гладких образцов и шпоночных соединений и существенным образом влияет на вид функции K_N и соотношение зон σ_1 . В нашем случае высокая концентрация напряжений ($K_1 \geq 2$) привела к росту максимальных значений K_N до $K_{Nmax} = 20$ и перемещению их в область высоких пере-напряжений, поэтому практический интерес представляет II зона σ_1 и особенно интервал $(1 \dots 1,3) \sigma_{1k}$, в пределах которых значения K_N и показатели ее рассеяния, в основном, зависят от параметров кривой выносливости шпоночных соединений (серии Г). На рис. 26 представлены значения K_N для всех трех зон σ_1 : линии Г₂ соответствуют K_N при $\sigma_1 = 1,25 \sigma_{1k}$. Для них максимальное расхождение вероятностных значений от K_N при $I(N) = 10 \dots 99,9\%$ составляет 34 ... 110% (вариационный коэффициент: $v_{K_N} = 10 \dots 27\%$).

В конечном итоге, расчетные значения K_u и K_N зависят от характера изменения параметров кривой выносливости m , C и показателей рассеяния долговечностей S_m и $S_{\sigma\tau}$, входящих в (1) и комплексно учитывающих влияние всех повреждающих факторов на прочность и долговечность соединений. На рис. 3 представлено изменение вероятностных значений m , C и вариационных коэффициентов v_m , v_C , v_N .

Из рис. 2 и 3 прослеживается общая тенденция поведения рассмотренных величин — с выводом из зоны максимальной напряженно-

сти второй по значимости концентратора (шпоночной канавки) вероятностные значения параметров достигают аналогичных величин для контрольной серии испытаний В в интервале $b = 4,5 \dots 5,5$ мм, тем самым вызывая снижение значений K_σ и K'_N . Следовательно, характер взаимодействия трех концентраторов согласуется с принципом неполного наложения надрезов [7], согласно которому наиболее острый концентратор, создавая основную часть поля напряжения сложного надреза и «подавляя» действие остальных, становится определяющим в оценке прочности и долговечности соединения.

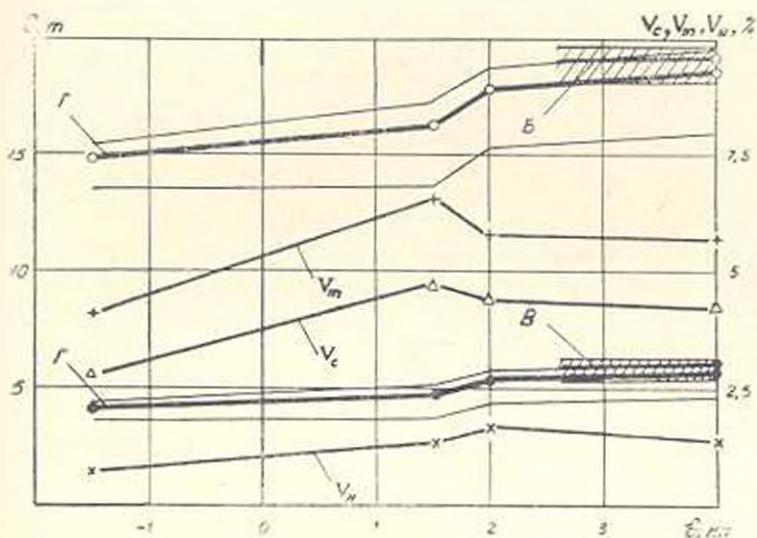


Рис. 3. Изменения параметров кривых выносливости и вариационных коэффициентов: \circ — C ; \bullet — m ; \triangle — v_r ; \div — v_m ; \times — v_N .

Взаимодействие концентраторов можно описать линейным законом изменения рассмотренных параметров в зависимости от их взаимного расположения:

$$y_i = \bar{y} + r \frac{S_y}{S_x} (x_i - \bar{x}) = A x_i + B, \quad (4)$$

где $A = r \frac{S_y}{S_x}$; $B = \bar{y} - Ax$; y_i — рассмотренные параметры; x_i — значения b_i .

Результаты вычислительных операций на ЭВМ представлены в табл.

Расчетные данные свидетельствуют о достаточной тесноте корреляционной связи между рассмотренными величинами. Доверительная оценка выборочного коэффициента корреляции показала, что согласно проверке по критерию линейности $H = |r| \sqrt{n-1}$ ($n = 5$) с надежностью вывода $P = 95\%$ можно отвергнуть гипотезу о некоррелированности рассмотренных величин. В таблице дано также процентное рас-

хождение Δ опытных и расчетных данных в рассмотренном интервале значений b , которое свидетельствует об удовлетворительном их совпадении и возможности применения в инженерных расчетах уравнения (4).

Таблица

№ № п/п	Параметр	$l(N)$, %	r	A	B	H	Δ , %
1	$C = f_1(b)$	10	0,9444	0,6358	16,7259	1,889	-2,7...4,6
2		50	0,9647	0,6332	15,9508	1,929	-3,7...3,7
3		99,9	0,9016	0,6264	13,8757	1,903	-8...4,9
4	$m = f_2(b)$	10	0,9454	0,2419	4,9171	1,891	-3,4...6,3
5		50	0,9629	0,2711	4,6041	1,926	-5,8...5,3
6		99,9	0,9072	0,2689	3,7661	1,814	-12,7...7,5
7	$K_0 = f_3(b)$	10	-0,798	-0,0296	1,91	1,596	-3,4...3,8
8		50	-0,9514	-0,0345	1,9623	1,903	-1,7...1,9
9		99,9	-0,7869	-0,0526	2,1801	1,574	-6,7...5,5
10	$\lg K_N = f_4(b)$	10	-0,896	-0,0441	0,3808	1,792	-9...10,9
11		50	-0,972	-0,0434	0,4746	1,944	-14,3...6,5
12		99,9	-0,7938	-0,0412	0,7263	1,588	-10,4...11,3

Результаты исследования позволяют определить границы расположения концентраторов, при которых на этапе конструирования можно исключить возможность их взаимодействия. Учитывая, что радиусы галтельных переходов валов для интервала диаметров $d = 17 \dots 100$ мм мало влияют на изменение опасного сечения галтели, возможно обобщить результаты опытов для интервала d , чаще применяемого в практике конструирования. Согласно опытным данным, при расположении опасных сечений галтели и шпоночной канавки на расстоянии $x \approx 3,5 r$ прочность и долговечность сложного концентратора в широком интервале вероятностей неразрушения определяется лишь действием наиболее острого из них — посадкой. Согласно графическим построениям:

$$x \approx b + \frac{b_{ш}}{2} - 0,75r,$$

откуда и получим зависимость для определения расстояния от торца вала до шпоночной канавки:

$$b \geq 4,25r - \frac{b_{ш}}{2}. \quad (5)$$

ԵՐԻՔԱՎՈՐ ՄԻԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ՑԻԿԼԱՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅՈՒՆՆԸ
ՈՒ ԵՐԿԱՐԱԿՆՑՈՒԹՈՒՆՆԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Դիտարկվում է շարժան կուտակիչների վերադրման էֆեկտի փոփոխումը «լիսեն-կունդ» (երիթավոր) միացման մեջ, որի վտանգավոր կտրվածքում դասավորված են դալսեյ, երիթային ակոս և անցումային նստեցում: Տրված է միացման ցիկլային ամրության և երկարակեցության հավանական գնահատականը՝ շարժան կուտակիչների փոխադարձ տեղաշարժման դեպքում և որոշված են նրանց անվտանգ գասավորումը բեռորոշող պարամետրերը, որի դեպքում բացառվում է նրանց փոխադարձ ազդեցությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Козаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных по времени.—М.: Машиностроение, 1977.— 232 с.
2. Олейник Н. В., Стакян М. Г. Расчетная оценка несущей способности осей при знакопостоянном циклическом нагружении.—Изв. АН Арм.ССР (сер. ТН), 1978, т. XXXI, № 6, с. 3—9.
3. Олейник Н. В., Стакян М. Г., Гаспарян С. А. Расчетная оценка выносливости валов при нагружении циклическим изгибом и статическим кручением.—Изв. АН Арм.ССР (сер. ГН), 1979, т. XXXII, № 1, с. 3—8.
4. Стакян М. Г., Гаспарян С. А., Мак С. Л. К оценке эффекта концентрации напряжений при стационарном режиме нагружения.—Изв. АН Арм.ССР (сер. ТН), 1973, т. XXVI, № 4, с. 21—27.
5. Сергеев С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность.—М.: Машиностроение, 1975.— 488 с.
6. Мак С. Л., Гаспарян С. А., Стакян М. Г. Исследование циклической прочности шпоночных соединений.— В кн.: Мат. юбил. научно-техн. конф., посвящ. 50-летию ОПИ. Машиностр. и экономика Одесса, изд. ОПИ, 1968, с. 108—116.
7. Мак С. Л., Стакян М. Г. Исследование эффекта наложения концентрации напряжений.—Изв. вузов. Машиностроение, 1969, № 1, с. 36—41.