

восстанавливает свои первоначальные свойства. Поэтому самым объективным для оценки влияния комплексного воздействия всех факторов на характеристики материала был бы эксперимент, непосредственно проходивший в РУЭ с записью полученных результатов.

Л и т е р а т у р а

1. Пластичность и разрушение. /Под ред. В.Л.Колмогорова. - М.: Металлургия, 1977. - 336 с.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 254 с.

УДК 629.7.018

А.А.Чураков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ

Конструктивный элемент представляет собой широко используемую в практике авиастроения деталь типа фитинга, выполненного из стали 1Х18Н10Т. Фитинг представляет собой фланец 1 с трубкой 2, соединенные между собой посредством сварного шва 3 (рис. 1). Для удобства нагружения трубке была несколько удлинена и заканчивалась специальной втулкой 4, через которую передавалась нагрузка. Фланец фитинга крепился с помощью двух болтов к неподвижной плите вибростенда. Нагрузка на фитинг передавалась через двойной шарнирный узел, один конец которого крепился к подвижной катушке электродинамического вибростенда, а другой конец, заканчивающийся сферическим шарниром, соединялся с втулкой.

Предполагалось, что в реальных условиях деталь работает на

подобно как консольная балка.

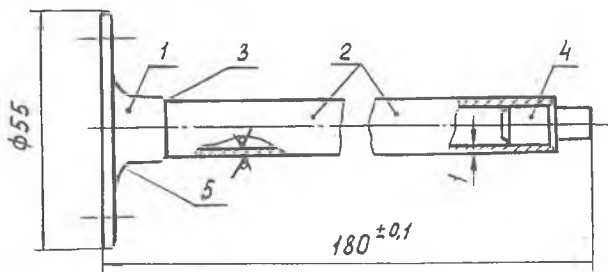


Рис. 1

Рассматриваемая деталь имеет два участка, на которых возможно хрупкое разрушение, а именно - переход от плоской части фланца на трубку, который выполнен в форме галтели, и зону сварного шва. Коматично зона сварного шва показана на рис. 2.

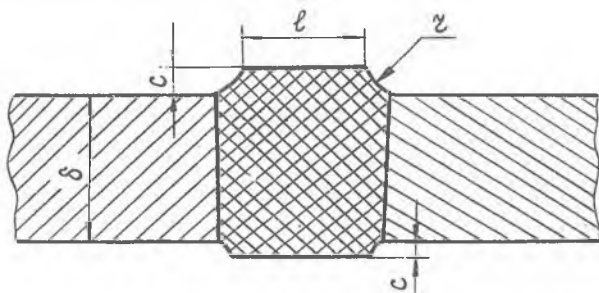


Рис. 2

Значение теоретического коэффициента концентрации напряжений для сварного шва α_B в значительной степени зависит от его геометрии, менее существенное значение оказывает толщина свариваемых материалов /1/. Величина коэффициента концентрации напряжений α_B может быть рассчитана по формуле /2/:

$$\alpha_B = 1 + \frac{r}{\pi A} \left[R \ln \frac{l+r}{2} - R_0 + z_1 R_1 - z_2^2 R_2 + T_0 \right], \quad (1)$$

где

$$A = \frac{a_1(ch a_1 - 1)}{k} + \frac{a_1^2}{2} \chi_1 sh a_1;$$

$$R = a_1 + 0,167 a_1^3 + 0,008 a_1^5; \quad R_0 = a_1 + 0,305 a_1^3 + 0,019 a_1^5;$$

$$R_1 = 0,33 a_1^3 + 0,033 a_1^5; \quad R_2 = 0,167 a_1^3 + 0,038 a_1^5;$$

$$\alpha = \left[\frac{k(\delta + 2c)}{c \ell \delta} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad a_1 = \alpha \cdot \ell_1; \quad \chi_1 = \chi / \ell, \quad T_0 = sh a_1; \quad k = 0,9 \left(\frac{\delta}{\delta + c} \right)^2.$$

Для расчета по формуле (I) были получены следующие параметры сварного шва: $c = 0,9$ мм; $\delta = 4,1$ мм; $\chi = 8$ мм; $\ell = 1$ мм. При этом $\alpha_6 = 1,2$. Согласно /I/ для тех же значений параметров сварного шва коэффициент концентрации напряжений можно принять равным 1,18, т.е. получатся близкие величины. В дальнейшем принимаем $\alpha_6 = 1,2$.

Величина теоретического коэффициента концентрации напряжений для галтели с радиусом $\chi_1 = 2$ мм в соответствии с /3,4/ составляет $\alpha_6 = 1,75$, что выше коэффициента концентрации напряжений в зоне сварного шва. Следовательно, местом наиболее вероятного разрушения детали является галтель.

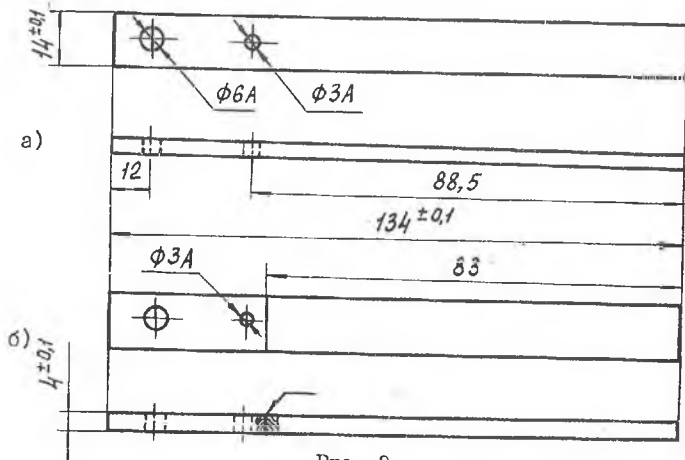


Рис. 3

В связи с тем, что концентраторы находятся в непосредственной близости друг от друга, необходимо оценить степень влияния сварного шва на напряженное состояние в зоне галтели. Такая оценка может

... получена путем проведения сравнительных испытаний двух типов образцов, а именно: образцов с концентратором в виде круглого отверстия (тип. I, рис. 3а) и образцов с двумя концентраторами (тип II, рис. 3б). При этом геометрия сварного шва и расстояние между концентраторами у образцов были такими же, как и у детали. Испытания проводились при гармонических нагрузках на двух уровнях напряжения σ . Результаты испытаний представлены в таблице I.

Таблица I

Тип образца	Испытано образцов	σ , МПа	$\bar{N}_p \cdot 10^{-4}$ циклов
I	12	340	28,6
II	12	340	28,8
I	12	385	4,06
II	12	385	3,9

Из таблицы видно, что средние значения долговечности образцов на равных уровнях напряжений практически одинаковы. Различия долговечности лежат в пределах разброса, обусловленного влиянием случайных факторов, т.е. сварной шов практически не оказывает влияния на напряженное состояние в окрестности отверстия. Следует ожидать, что и для фитинга сварной шов не будет сказываться на напряженном состоянии в зоне галтели.

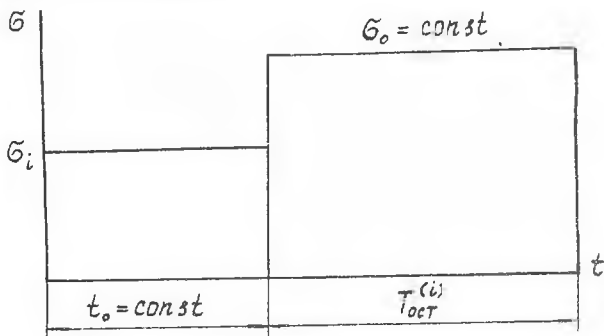


Рис. 4

Долговечность деталей при случайном нагружении определялась по кривым усталости этих деталей при простых гармонических режимах нагружения с использованием эквивалентных нагрузок σ_3 . Для этого были проведены испытания двух партий деталей при двухступенчатом нагружении, схема которого показана на рис. 4.

На первой ступени нагружения длительностью $t_0 = 600$ с одна партия деталей испытывалась на 3 уровнях напряжения σ гармонической нагрузки, а вторая - на трех уровнях среднеквадратичных напряжений \bar{S} при случайном нагружении. На второй ступени испытания проводились при постоянном для всех деталей уровне гармонической нагрузки $\sigma_0 = 480$ МПа до момента образования трещины. В результате этих испытаний были получены значения остаточной долговечности $T_{ост}$ (при гармоническом нагружении на первой ступени) и $T'_{ост}$ (при случайном нагружении на первой ступени). Относительные значения остаточной долговечности $\bar{T}_{ост} = T_{ост}/T_0$ ($T_0 = 1800$ с) были использованы для построения графика, показанного на рис. 5.

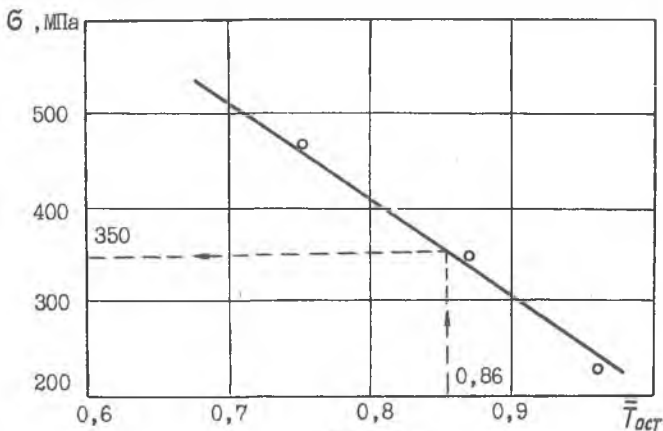


Рис. 5

Эквивалентные гармонические режимы σ_3 определялись с использованием относительной остаточной долговечности $\bar{T}'_{ост}$ (графа 2, табл. 2) по графику рис. 5 и приведены в графе 3 таблицы 2.

Таблица 2

\bar{S} , МПа	$\bar{T}'_{ост}$	σ_3 , МПа
1	2	3
232	0,86	350
268	0,79	425
330	0,68	534

Третья партия деталей была испытана на четырех уровнях гармонической нагрузки σ . По результатам этих испытаний были построены для 50% вероятности кривые усталости фитингов по моменту образования усталостной трещины (1) и по разрушению (2). Они представлены на рис. 6.

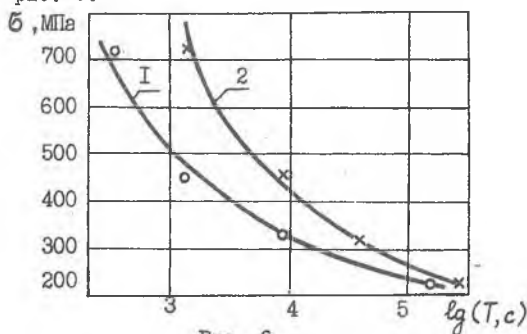


Рис. 6

По этим кривым и значениям σ_3 таблицы 2 найдены расчетные значения долговечности $T_{рас}$ для случайного нагружения деталей. Результаты сведены в таблицу 3.

Для оценки точности расчетных значений долговечности были проведены усталостные испытания деталей на соответствующих уровнях СКО (см. табл. 2). Экспериментально полученные значения долговечности $T_{экс}$ показаны в графах 5 и 8 таблицы 3. В этой же таблице даны погрешности $\Delta = \frac{T_{экс} - T_{рас}}{T_{рас}} \cdot 100\%$ расчетного определения долговечности по времени образования трещины и по разрушению при случайном нагружении деталей по эквивалентным напряжениям σ_3 .

Таблица 3

\bar{S} , МПа	$\bar{T}'_{ост}$	σ_3 , МПа	Образование трещин			Разрушение		
			$T_{рас, КС}$	$T_{экс, КС}$	$\Delta, \%$	$T_{рас, КС}$	$T_{экс, КС}$	$\Delta, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
232	0,86	350	6	6,3	4,7	22,4	25	10,4
268	0,79	425	2,1	2,4	12,5	9,3	10	7
330	0,68	534	0,78	0,83	6,6	4,2	4,3	3,5

Из таблицы 3 видно, что порядок погрешностей Δ расчетного определения долговечности деталей по эквивалентным напряжениям σ_3 и для момента образования усталостной трещины, и для разрушения одинаков. Однако статистический анализ погрешностей Δ дает возможность более обоснованно судить о том, можно ли для определения долговечности по разрушению использовать эквивалентные напряжения, полученные на стадии до образования усталостной трещины.

Для этого вычислим средние m_Δ и среднеквадратичные \bar{S}_Δ значения погрешностей по моменту образования трещины и по разрушению /5/:

$$m_\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}; \quad (2)$$

$$\bar{S}_\Delta = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - m_\Delta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где n - количество уровней СКО, на которых проводились испытания. Результаты вычислений представлены в таблице 4. Из таблицы видно, что как средние m_Δ погрешностей для разрушения деталей, так и их среднеквадратичные отклонения \bar{S}_Δ несколько ниже, чем по моменту образования трещины. Следовательно, таблица 4 показывает, что расчет долговечности деталей до разрушения по эквивалентным напряжениям σ_3 , определяемым на стадии до образования трещины, влияет на величину как m_Δ , так и \bar{S}_Δ .

Для оценки значимости этого влияния проведем сравнение дисперсий \bar{S}_Δ^2 и средних m_Δ погрешностей. Такое сравнение покажет, принадлежат ли выборки, по которым подсчитывались статистики \bar{S}_Δ

и m_{Δ} , к одной генеральной совокупности.

Таблица 4

	m_{Δ}	\bar{S}_{Δ}
По трещине	7,9	4,07
По разрушению	6,9	3,45

Для сравнения дисперсий \bar{S}_{Δ}^2 воспользуемся односторонним (как более жестким) критерием F Фишера /5/:

$$\bar{S}_{\Delta_1}^2 / \bar{S}_{\Delta_2}^2 \leq F_{1-p}(f_1, f_2). \quad (4)$$

Здесь $\bar{S}_{\Delta_1}^2$ и $\bar{S}_{\Delta_2}^2$ - соответственно большая и меньшая дисперсии погрешностей Δ_i ; p - выбранный уровень значимости ($p = 0,05$); f_1 и f_2 - числа степеней свободы выборок, дисперсии которых сравниваются. В нашем случае $f_1 = f_2 = n - 1$.

Для сравнения средних m_{Δ} погрешностей был использован критерий, основанный на распределении Стьюдента /5/:

$$|m_{\Delta_1} - m_{\Delta_2}| < t_{1-p} \cdot S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}, \quad (5)$$

где m_{Δ_1} и m_{Δ_2} - сравниваемые средние погрешностей Δ_i ; t_{1-p} - квантиль распределения Стьюдента; n_1 и n_2 - объем выборок (у нас $n_1 = n_2 = n$);

$S^2 = \frac{(n_1 - 1)\bar{S}_{\Delta_1}^2 + (n_2 - 1)\bar{S}_{\Delta_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}$ - средневзвешенная дисперсия; $p = 0,05$.

Если левые части в (4) и (5) окажутся меньше правых, то выборки можно считать однородными, принадлежащими одной генеральной совокупности.

Результаты вычислений по формулам (4) и (5) приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнение \bar{S}_{Δ}		Сравнение m_{Δ}	
$\bar{S}_{\Delta_1}^2 / \bar{S}_{\Delta_2}^2$	I, 18	$ m_{\Delta_1} - m_{\Delta_2} $	I
$F_{1-p}(f_1, f_2)$	I9,2	$t_{1-p} \cdot \bar{S} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$	8,52

. Из таблицы 5 видно, что средние m_{Δ} погрешностей Δ и их дисперсии \bar{S}_{Δ}^2 как по моменту образования трещины, так и по разрушению деталей удовлетворяют критериям (4) и (5).

Следовательно, использование эквивалентных режимов нагружения $\bar{\sigma}_3$, определяемых на стадии до образования видимой трещины, не вносит дополнительной погрешности в расчет долговечности по разрушению деталей.

Л и т е р а т у р а

1. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.Н. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. - М.: Машиностроение, 1975. - 488 с.
2. Мюнзе В.Х. Усталостная прочность сварных стальных конструкций. - М.: Машиностроение, 1968. - 312 с.
3. Форрест П. Усталость металлов. - Машиностроение, 1968. - 352 с.
4. Sors L. *Bezeichnung der Dauerfestigkeit von Maschinenteilen.* Veb. verlag Technik, Berlin, 1963, 188 с.
5. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. - М.: Наука, 1968. - 288 с.