

## ВЛИЯНИЕ СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ ИЗГИБА И КРУЧЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ

В работе исследуется усталостная прочность круглых образцов из стали 30ХГСА при совместном знакопеременном действии изгибающего и крутящего моментов.

Эксперимент проводился на установке, созданной в Куйбышевском авиационном институте. В ее исполнительную часть входят два низкочастотных электродинамических вибратора, один из которых нагружает образцы изгибающим моментом по схеме чистого изгиба. С помощью второго образцы через систему рычагов нагружаются крутящим моментом. Необходимый сдвиг фаз задается и поддерживается блоком постоянного запаздывания, введенным в задающую часть установки.

Исходя из возможностей установки, испытания осуществлялись на сплошных цилиндрических образцах, форма и размеры которых даны на рис. 1.

Обработка поверхностей образцов в пределах рабочей части соответствовала 8—9 классу чистоты. Окончательная доводка шлифовальным производилась после термообработки. Режим термообработки — закалка в масле при температуре  $870 \pm 10^\circ$  с последующим

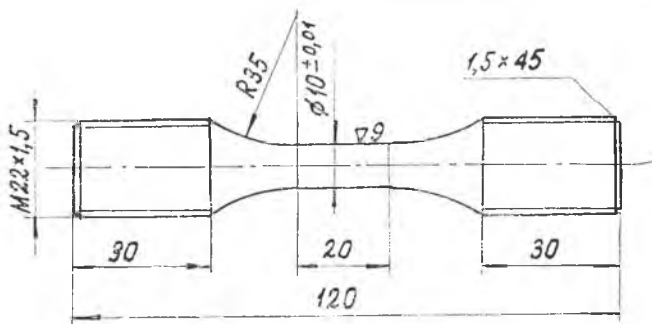


Рис. 1.

отпуском в течение часа при температуре  $370 \pm 10^\circ$ . Проведенные контрольные статические испытания образцов на растяжение и кручение показали, что они имеют следующие механические характеристики: предел прочности при растяжении  $\sigma_b = 131 \text{ кг/мм}^2$ , при кручении —  $\tau_b = 99 \text{ кг/мм}^2$ ; предел текучести при растяжении  $\sigma_T = 114 \text{ кг/мм}^2$ , при кручении —  $\tau_T = 73 \text{ кг/мм}^2$ ; относительное удлинение  $\delta = 19,9\%$ .

Усталостные исследования проводились при гармонических нагрузках с частотой 10 герц. В процессе испытаний варьировалось соотношение между амплитудными значениями нормальных  $\sigma_a$  и касательных  $\tau_a$  напряжений. Оно принималось равным 0; 0,5; 1; 2; 4 и  $\infty$ . В течение эксперимента осуществлялся тщательный контроль за моментом появления видимой трещины методом проникающих красок с использованием микроскопа «Мир». За долговечность по моменту появления трещины принималось время (или число циклов), при котором видимая трещина достигала 0,05 мм. За критерий полного разрушения принималось разделение образца на две части. Статистическая обработка экспериментальных данных по моменту появления видимой трещины и разрушению проводилась на основе линейного регрессионного анализа [1].

Результаты испытаний сопоставлялись по величине наибольших за цикл значений максимальных касательных напряжений. Текучие значения максимальных касательных напряжений при совместном действии изгиба и кручения определялись по формуле

$$\tau_{\max}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_a^2 \sin^2 \omega t + 4\tau_a^2 \sin^2(\omega t + \alpha)}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол сдвига фаз. В случае  $\alpha = 0$  уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\tau_{\max}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_a^2 + 4\tau_a^2} \cdot |\sin \omega t| \quad (2)$$

Отсюда вытекает, что характер функции  $t_{\max}(t)$  остается неизменным при любом соотношении амплитуд  $\sigma_a$  и  $\tau_a$ . Тогда как при  $\alpha \neq 0$  изменение максимального касательного напряжения зависит от величины  $\sigma_a/\tau_a$ .

Графики зависимости  $\tau_{\max}$  от соотношения между амплитудными значениями  $\sigma_a$  и  $\tau_a$  при  $\alpha = 0$  и  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  представлены на рис. 2. Из приведенных графиков видно, что средние значения  $\tau_{\max}$  за цикл зависят от характера нагружения.

Для дальнейших рассуждений удобно ввести понятие «коэффициента полноты диаграммы»

$$\eta = \frac{\int_0^T \tau_{\max} \cdot dt}{(\tau_{\max \max}) \cdot T} \quad (3)$$

Этот коэффициент характеризует соотношение между средним значением максимального касательного напряжения за цикл и наибольшим его значением  $\tau_{\max \max}$ . Числовые значения коэффициента

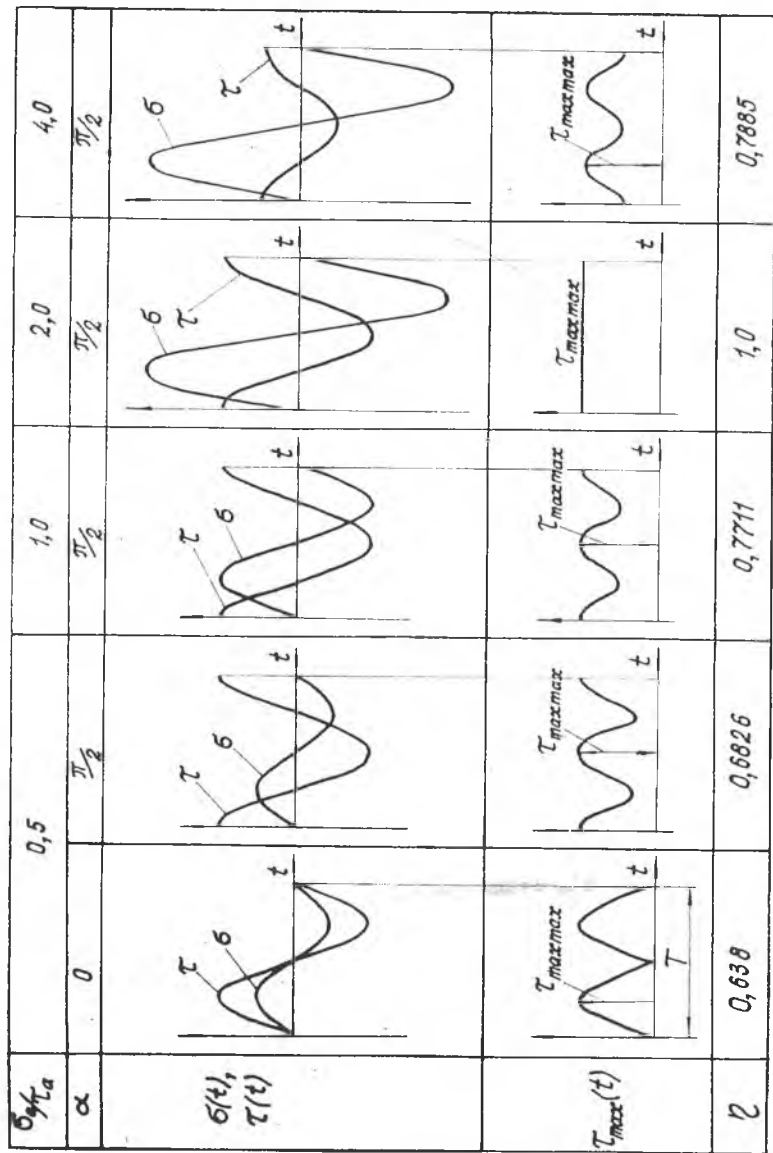


Рис. 2.

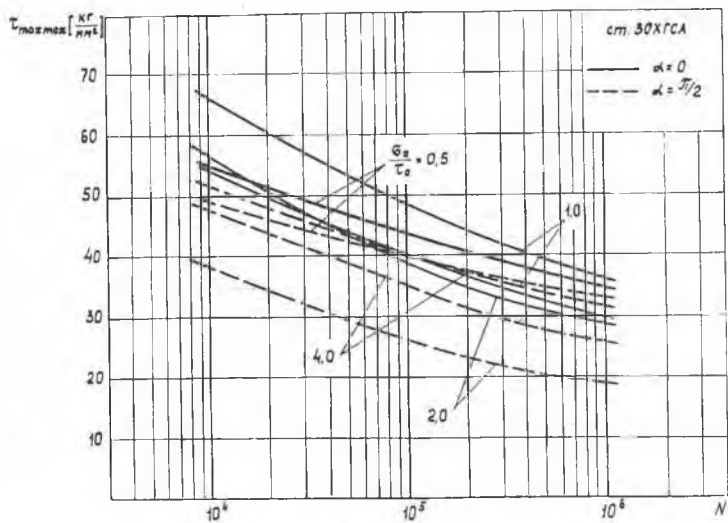


Рис. 3.

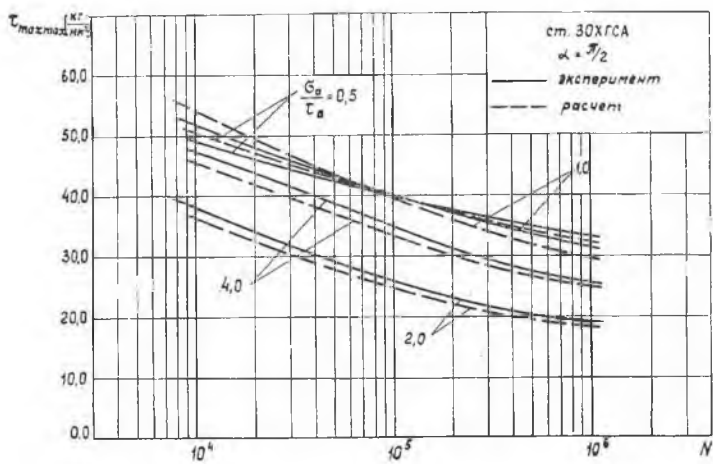


Рис. 4.

Материал	$\sigma_a / \tau_a$	$\alpha$ град	$\eta$	$\tau_{\max} \max \left[ \frac{\kappa \tau}{M.M^2} \right]$		Погрешность в %	
				по [2]	по формуле (4)		
Средняя сталь $\sigma_B = 38,1 \frac{\kappa \tau}{M.M^2}$ $\sigma_T = 22,6 \frac{\kappa \tau}{M.M^2}$ $\psi = 68\%$ $\delta = 43\%$	0,83	0	0,638	13,3	—	—	
		60	0,693	13,05	12,7	2,6	
		90	0,731	13,4	12,67	5,2	
	2,0	0	0,638	13,0	—	—	
		60	0,797	11,95	11,05	7,0	
		90	1,000	10,25	9,28	9,3	
	4,83	0	0,638	12,3	—	—	
		90	0,730	11,75	11,1	5,5	
	Твердая сталь $\sigma_B = 69,4 \frac{\kappa \tau}{M.M^2}$ $\sigma_T = 40,0 \frac{\kappa \tau}{M.M^2}$ $\psi = 45\%$ $\delta = 29\%$	0,83	0	0,638	18,4	—	—
30			0,667	18,3	17,9	2,2	
60			0,693	18,35	17,9	2,5	
90			0,731	18,5	17,48	6,0	
2,0		0	0,638	17,7	—	—	
		30	0,686	17,4	16,8	3,5	
		60	0,797	15,8	14,59	7,6	
		90	1,000	13,2	11,9	9,2	
4,83		0	0,638	16,5	—	—	
		90	0,730	15,5	14,7	5,2	
Дуралюминий $\sigma_B = 43,7 \frac{\kappa \tau}{M.M^2}$ $\sigma_T = 30,6 \frac{\kappa \tau}{M.M^2}$ $\psi = 21\%$ $\delta = 15\%$		2,0	0	0,638	8,7	—	—
			90	1,000	6,15	5,6	9,0

$\eta$  приведены на рис. 2. Характерно, что наибольшее значение, равное 1, он принимает для  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  при  $\sigma_a / \tau_a = 2$ .

На рис. 3 приведены кривые усталости по разрушению для различных отношений  $\sigma_a / \tau_a$  при синфазном нагружении (сплошные линии) и нагружении со сдвигом фаз (штриховые линии). Кривые соответствуют 50%-ой вероятности.

Сопоставление графиков рис. 2 и 3 показывает, что при сложном напряженном состоянии усталостная прочность тем ниже, чем выше среднее значение максимального касательного напряжения. Более того, можно показать, что при фиксированном числе циклов

$N$  и вполне определенном соотношении амплитуд  $\sigma_a/\tau_a$  усталостная прочность, выражаемая наибольшими значениями максимального касательного напряжения, **обратно** пропорциональна средним значениям  $\tau_{\max}$  за цикл:

$$\frac{(\tau_{\max \max})_{N, \alpha \neq 0}}{(\tau_{\max \max})_{N, \alpha = 0}} = \frac{\eta_{\alpha=0}}{\eta_{\alpha \neq 0}} = a \quad (4)$$

Расчет коэффициента  $a$  для любых значений углов сдвига фаз не представляет затруднений.

Используя кривые усталости при  $\alpha=0$  (рис. 3) и формулу (4), построим усталостные кривые для  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . На рис. 4 они показаны штриховыми линиями, а сплошными — экспериментальные кривые для  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Сопоставление расчетных кривых с экспериментальными показывает их вполне удовлетворительное согласование.

В работе [2] приведены результаты усталостных испытаний для ряда материалов при различных значениях сдвига фаз между напряжениями изгиба и кручения. В таблице 1 дано для  $\alpha \neq 0$  сопоставление экспериментальных данных работы [2] с результатами расчета по формуле (4). Цифры оказываются достаточно близкими.

Таким образом, зная усталостные характеристики при плоском напряженном состоянии для синфазного изгиба и кручения, можно расчетным путем построить кривые усталости и при любом значении сдвига фаз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степнов М. Н., Гнацинтов Е. В., Кобаев В. П. Статистическая обработка результатов усталостных испытаний на основе линейного регрессионного анализа. Сб. «Проблемы прочности в машиностроении», М., изд-во АИ СССР, 1959, вып. 3, 71.
2. R. E. Little. A note on the shear stress criterion for fatigue failure under combined stress. «The Aeronautical Quarterly», 1969, 20, № 1, p. 57—60.