

ния; K_A – коэффициент анизотропии; K_F – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности; θ – относительный критерий подобия усталостного разрушения; v_σ – коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений и влияния абсолютных размеров детали.

Для определения предела выносливости материала БЦ (бронзы Бр012) были проведены усталостные испытания образцов, рис. 2. Химический состав бронзы: 12 % Sn; 1,3 % Pb; 1 % Ni; остальное Cu. Механические свойства: предел прочности $\sigma_B=320$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{0,2}=180$ МПа; относительное удлинение при разрыве $\delta=12$ %; твердость 56...58 HRB (101...104 HB).

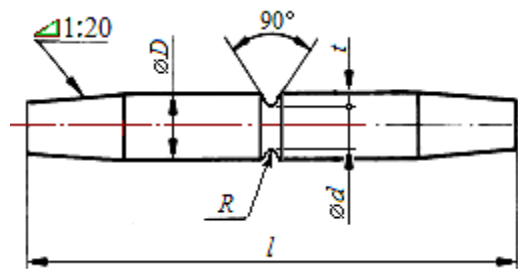


Рис. 2. Образец для усталостных испытаний

Размеры и характеристики испытанных образцов двух типов приведены в табл. 1. Здесь также представлен теоретический коэффициент концентрации напряжений K_t , который определен по формуле Нейбера, критерий подобия L/\bar{G} и относительный критерий подобия θ усталостного разрушения по [2].

Таблица 1 – Параметры образцов

Форма рабочей части образца	Размеры, мм					K_t	L/\bar{G} , мм ⁻¹	θ
	l	D	d	t	R			
корсетный	100	11	7,5	1,75	75	1,014	77,62	0,8785
с надрезом 90°	100	11	7,5	1,75	1	1,737	9,27	0,1094

Испытания проведены при чистом круговом изгибе с частотой нагружения 50 Гц. База испытаний составляла $N_0=10^8$ циклов. Для описания кривой усталости использовано степенное уравнение

$$\sigma^m N = \sigma_{-1}^m N_G = 10^C = const, \quad (2)$$

где σ и N – текущее значение напряжения испытаний и соответствующая ему долговечность до разрушения; m и C – параметры; σ_{-1} – предел выносливости материала при симметричном цикле изменения напряжений, N_G – абсцисса точки перелома кривой усталости, построенной в двойных логарифмических координатах. Кривые усталости для корсетных (круглые значки) и надрезанных (квадратные значки) образцов, построенные по результатам усталостных испытаний, представлены на рис. 3. Темные значки соответствуют поломанным образцам, светлые – образцам, не разрушившимся до базы испытаний.

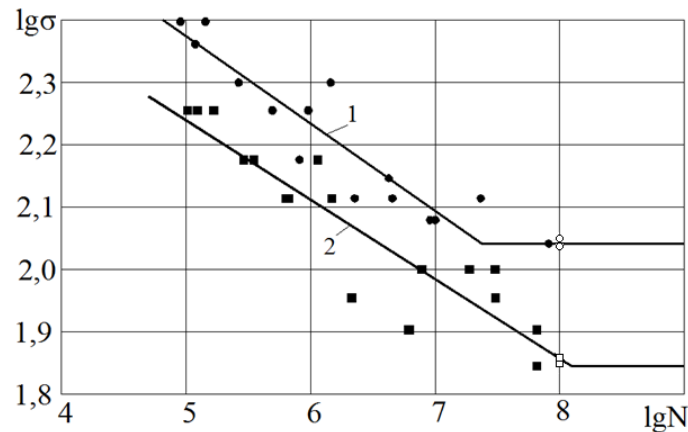


Рис. 3. Кривые усталости: 1 – корсетные образцы, 2 – надрезанные образцы

В результате проведения усталостных испытаний и корреляционно-регрессионного анализа получены характеристики уравнения (3), которые представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов для испытанных образцов

Форма рабочей части образца	m	C	N_G , цикл.	σ_{-1} , МПа	r	σ_{\max} , МПа
корсетный	7,14	21,94	$2,365 \cdot 10^7$	110	– 0,919	111,54
с надрезом	7,84	22,56	$1,228 \cdot 10^8$	70	– 0,889	121,59

Пределы выносливости σ_{-1} определены как уровни напряжений, при которых из трех образцов два не разрушились. Максимальное напряжение, соответствующее пределу выносливости $\sigma_{\max} = K_f \cdot \sigma_{-1}$.

Вычисленные значения модуля коэффициентов корреляции $|r| \approx 0,9$ свидетельствуют, что между величинами $\lg \sigma$ и $\lg N$ существует сильная корреляционная связь.

Стандарт [2] содержит рекомендации по расчету параметров уравнения (1). Параметр K_F , учитывающий шероховатость поверхности, при $R_z = 1,6$ мкм определен по формуле

$$K_F = 1 - 0,22 \lg R_z \cdot \left(\lg \frac{\sigma_B}{20} - 1 \right) = 0,99 .$$

Коэффициент анизотропии $K_A = 0,9$ при $\sigma_B < 600$ МПа, коэффициент упрочнения $K_V = 1$ (упрочнение не выполнялось).

Относительный критерий подобия усталостного разрушения отношения (см. табл. 1)

$$\theta = (L/\bar{G}) / (L_0/\bar{G}_0), \quad (3)$$

где $(L_0/\bar{G}_0) = 88,3 \text{ мм}^2$ – критерий подобия гладких лабораторных образцов диа-

метром 7,5 мм, (L/\bar{G}) – критерий подобия для БЦ, \bar{G}_0 и \bar{G} – относительные градиенты первого главного напряжения в зоне его концентрации для образца и БЦ соответственно.

Параметром L является длина периметра опасного сечения или его части, где действуют максимальные напряжения. Аналитическое вычисление значений L и G для БЦ невозможно в связи со сложностью его конструкции, поэтому был выполнен расчет по МКЭ при давлении в зоне нагнетания $p=25$ МПа. Результаты расчетов для рассмотренного семипоршневого БЦ были представлены в работе [1]: $L=174,4$ мм; $\bar{G}=0,02137$ мм⁻¹; $K_i=1,28$. Следовательно, по формуле (3) получено $\theta=9,24$.

Для определения коэффициента чувствительности металла к концентрации напряжений и влиянию абсолютных размеров детали использована формула из справочника [3]. Для случая испытаний образцов двух типов она имеет вид

$$v_\sigma = -\frac{\lg(\xi_1 - 1)}{\lg\theta_1} = -\frac{\lg(\xi_2 - 1)}{\lg\theta_2}, \quad (4)$$

где $\xi_1 = \sigma_{\max 1}/u$, $\xi_2 = \sigma_{\max 2}/u$ (значения σ_{\max} приведены в табл. 2); u – минимальное значение повреждающих напряжений, которое принимается равным половине предела выносливости гладкого лабораторного образца [3].

Из формулы (5) следует получено трансцендентное уравнение

$$\frac{\sigma_{\max 1}}{\sigma_{\max 2}} = \frac{1 + \theta_1^{-v_\sigma}}{1 + \theta_2^{-v_\sigma}},$$

решение которого дает значение $v_\sigma=0,0792$.

Предел выносливости гладкого лабораторного образца можно найти по одной из двух формул

$$\bar{\sigma}_{-1} = \frac{2\sigma_{\max 1}}{1 + \theta_1^{-v_\sigma}} = \frac{2\sigma_{\max 2}}{1 + \theta_2^{-v_\sigma}}, \quad (5)$$

Вычисления по формулам (5) дают одинаковые значения $\bar{\sigma}_{-1}=111,0$ МПа. Следовательно, минимальное значение повреждающих напряжений $u = 0,5\bar{\sigma}_{-1} = 55,5$ МПа.

По формуле (1) определен для БЦ предел выносливости $\bar{\sigma}_{-1D}=71,23$ МПа. Полученное значение характеризует работу БЦ при симметричном цикле изменения напряжений. Это значение меньше установленного выше предела выносливости образцов в $111/71,23=1,56$ раза. Фактически в процессе работы напряжения в БЦ изменяются практически по отнулевому циклу и для такого нагружения рассчитан предел выносливости по зависимости Зодерберга: $\bar{\sigma}_{0D}=102,1$ МПа. Испытаниями на сопротивление усталости АПГ 210.25 было установлено, что предел выносливости БЦ соответствует давлению в зоне нагнетания $p=18,2$ МПа [4]. Для БЦ семипоршневой АПГ напряжение определяется через давление формулой $\sigma=5,16p$ [5]. Следовательно, экспериментально установленный предел выносливости БЦ $\bar{\sigma}_0=93,9$ МПа. Следовательно, расчетный предел выносливости оказался больше экспериментально установленного значения на 8,7 %.

Вывод. Предложенный экспериментально-аналитический метод, основанный на испытаниях образцов из материала БЦ, позволяет вычислить предел выносли-

вости без проведення дорогостоящих натурних испытаній АПГ. Полученные расчетные значения предела выносливости удовлетворительно коррелируются с известными результатами натурних испытаній.

Список литературы

1. Khomyak Yu., Kibakov O., Medvedev S., Nikolenko I., Zheglova V. / Endurance limit of the axial-piston hydraulic machine cylinder block / *Diagnostyka*, 2020. – 21(1). – P. 71–79.
2. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – 82 с.
3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Додин Л.Г. Методы испытаній аксиально-поршневых гидромашин // *Тр. ВНИИСтройдормаш*, 1981. – Вып. 92. – С. 23–29.
5. Николенко И.В., Хомяк Ю.М., Кобаков А.Г. Расчет на долговечность блока цилиндров гидромашин / *Вестн. машиностроения*, 1988. – №. 2. – С. 26–29.