

Г. А. УНАНЯН, Г. К. МАРКАРЯН

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ВАЛИКОВ С НАПРЕССОВАННЫМИ ВТУЛКАМИ

Снижение усталостной прочности валов и осей в месте запрессовки общезвестно. Причиной этого является концентрация напряжений от посадки и контактное трение между рабочими поверхностями втулки и валика. Величина концентрации напряжений зависит от физико-механических свойств и конструктивных форм поверхностей, а также от контактного давления сопряжения. Контактное трение обусловливается физико-механическими свойствами контактирующих поверхностей, их качеством (микрогеометрия, макрогеометрия, остаточные напряжения), контактным давлением и амплитудой относительных перемещений сопряженных деталей [1—4].

Упрочнение поверхности охватывающей детали может увеличить прочность прессового соединения более чем на 50% [7]. При поверхностном упрочнении происходит увеличение микротвердости и шероховатости и возникают сжимающие остаточные напряжения. Если увеличение шероховатости и наличие сжимающих напряжений благоприятно влияют на процессы контактного трения [3, 4], то увеличение микротвердости должно усиливать процесс фреттинг-коррозии.

Усталостная прочность валов и осей с напрессованными втулками, охватывающая поверхность которых упрочнена, представляет практический интерес, если учесть, что упрочняющая обработка отверстий находит все более широкое применение в машиностроении.

В работе рассматривается влияние на усталостную прочность валов напрессованной втулки, рабочая поверхность которой упрочнена поверхностным дорнованием (ПД). Усталостные испытания круговым изгибом проводили на специально изготовленной машине. Размеры образцов и схема нагружения показаны на рис. 1а, б.

Данные об использованных материалах втулки и валика приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование детали	Материал	Термообработка нормализация	σ_B кг/мм ²
Втулка Валик	Сталь 3	930°C воздух	110—115
	Сталь 45	830°C воздух	197—217

Окончательная обработка шейки валика произведена шлифованием по 8-му классу шероховатости. Отверстия втулок перед ПД протягивались с чистотой поверхности $\nabla 7 \rightarrow \nabla 8$.

Поверхностное дорнование произведено с натягом $i=0,205$ мм ($b/d=0,014$), что соответствует периоду полной перегрузки стенки втулки, когда не происходит изменения остаточных напряжений и увеличение макротвердости незначительно. Для устранения краевого эффекта концы ПД втулки после обработки подрезали с двух сторон. Чистота поверхности после ПД соответствовала $\nabla 10$, а микротвердость по глубине стенки изменилась согласно кривой на рис. 2. С целью установления влияния только упрочнения и сохранения идентичных макро- и микрогеометрии часть упрочненных втулок была подвергнута вакуумному отжигу в печи СГВ23/15-2, для снятия остаточных напряжений и оплавления. Втулки напрессовались с натягом $N=0,020$ мм на гидравлической испытательной машине ЦДТ-30 со скоростью 1 мм/мин. с применением машинного масла «Л».

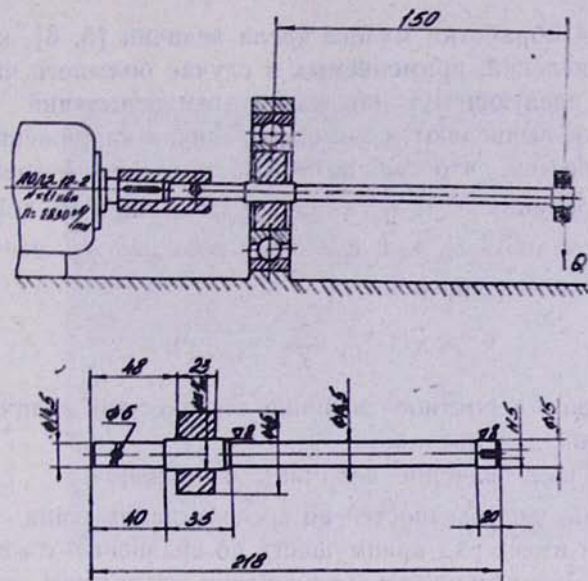


Рис. 1. а) Схема нагружения образца. б) Размеры испытуемого образца.

Как показали испытания, поломка валков происходила на расстоянии $1 \div 2$ мм от торца втулок. Для исследования состояния контактных поверхностей после усталостных испытаний втулки разрезались, после чего на поверхностях четко были видны кольцеобразные зоны контактного трения шириной $2 \div 3$ мм на рабочих поверхностях валика втулки и продукты трения в виде мелкодисперсного порошка. Зона контактного трения на образцах имеет четко выраженный темно-коричневый цвет. При визуальном осмотре состояния контактных поверхностей друг от друга почти не отличаются. При рассмотрении микроструктуры рабочей зоны соединения видно, что для упрочненных втулок деформация, вызванная переменным изгибом, значительна, тогда как для отожженных незаметна (рис. 3 а, б).

Для обработки экспериментальных данных был применен метод

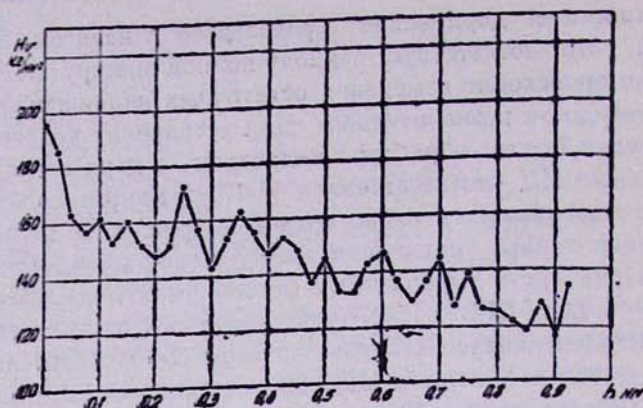


Рис. 2. Распределение величины микротвердости по глубине стенки втулки.

статистической обработки малого числа величин [5, 6], который отличается от вычислений, применяемых в случае большого числа величин, и сводится к следующему: по результатам испытаний составляются таблицы (2, 3), вычисляются моменты величин напряжений и логарифмов долговечностей, что дает возможность в свою очередь подсчитать основные отклонения σ_x и σ_y , а также коэффициент корреляции $r_{1/1}$. Найденные величины σ_x , σ_y и $r_{1/1}$ дают возможность составить линейное корреляционное уравнение.

$$x_y = \bar{x} + r_{1/1} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y_1 - y), \quad (1)$$

где $\bar{x}$ — среднее вероятное значение статической величины логарифма циклической долговечности;

y_1 — текущее значение величины напряжения.

Вычисление долговечностей по способу нахождения средневероятного значения имеет ряд преимуществ по сравнению с методом нахождения среднего арифметического значения на каждом данном уровне нагружения, основным из которых являются: ограниченное число образцов, необходимых для испытания (не более 12÷16 шт); возможность сравнения между собой различных технологических приемов изготовления образцов по величине меры индивидуального рассеяния $\bar{\sigma}_x$.

$$\bar{\sigma}_x = \sigma_x \sqrt{1 - r_{1/1}^2}. \quad (2)$$

По результатам усталостных испытаний было составлено линейное корреляционное уравнение. Это уравнение имеет вид:

$$x_y = 8,91149 - 0,115466 y_1 \quad (3)$$

для валов с напрессованными вакуумно-отожженными втулками и для

$$x_y = 8,064468 - 0,08343 y_1 \quad (4)$$

для валов с напрессованными упрочненными втулками.

Вид этих кривых показан на рис. 4.



а



б

Рис. 3. Микрофотографии контактной зоны Х150: а) втулка упрочненная; б) втулка разупрочненная.

Как видно, пределы выносливости в рассмотренном интервале долговечности $N_1 = 10^5 \div 10^7$ не претерпевают существенных изменений. Длительные пределы выносливости для образцов с напрессованными отоженными втулками равны $\sigma_{10} = 18,6 \text{ кг/мм}^2$, а с поверхностно-дорнованными втулками $\sigma_{1\text{пл}} = 17,6 \text{ кг/мм}^2$. В области ограниченной долговечности пересечение наклонных участков кривых выносливости происходит при $N_1 = 8,7 \cdot 10^5$. Показатель наклона кривых также существенно не меняется. Лишь для образцов с поверхностно-дорнованными отверстиями наблюдается некоторое снижение критериев нелинейности ($r_{1/l} = 0,868$) и расширение областей рассеяния циклических долговечностей, которые оцениваются мерой индивидуально-

Таблица 2

Статистическая обработка результатов испытаний на усталость (втулки упрочненные)

y_i кг/мм ²	$y_i = y_i - a_2$	y_i^2	$x_i = \lg N$	$x_i = X_i - a_2$	x_i^2	$x_i \cdot y_i$	$x_i + y_i$	$(x_i + y_i)^2$	
30	5,7	32,49	5,6542	-0,3854	0,148533	-2,19678	5,3146	28,244973	
30	5,7	32,49	5,6191	-0,4205	0,17682	-2,39685	5,2795	27,873120	
27,7	3,4	11,56	5,8116	-0,228	0,051984	-0,7752	3,172	10,061584	
25,03	0,73	0,5329	5,8241	-0,2155	0,04644	-0,157315	0,5145	0,264710	$Z_{1/1} = \frac{\mu_{1/1}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} = -0,865$
25,03	0,73	0,5329	6,0	-0,0396	0,001568	-0,028908	0,6904	0,476622	
22,40	-1,9	3,61	5,9917	-0,0479	0,002294	-0,09101	-6,9479	3,852751	
20	-4,3	18,49	6,1903	0,1507	0,022710	-0,64801	-4,1493	17,216690	
20	-4,3	18,49	6,2529	0,2133	0,045497	-0,91719	-4,0867	16,701117	
18,25	-6,05	36,60	7,0128	0,9732	0,947118	-5,88786	-5,0768	25,773898	

$$\Sigma y_i = 218,66 \quad \Sigma y_i = 0,290 \quad \Sigma y_i^2 = 154,798 \quad \Sigma x_i = 54,3567 \quad \Sigma x_i = 0,0017 \quad \Sigma x_i^2 = 1,442964 \quad \Sigma x_i y_i = -12,9171 \quad \Sigma (x_i + y_i) = 0,2890 \quad \Sigma (x_i + y_i)^2 = 130,465465$$

$$a_1 = 24,295 \quad a_2 = 6,0396 \quad x_y = \bar{x} + r_{1/1} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y_i - \bar{y})$$

$$n = 9 \quad m_{1/0} = \frac{\Sigma y_i}{n} = 0,032 \quad m_{2/0} = \frac{\Sigma y_i^2}{n} = 17,199778$$

$$m_{0/1} = \frac{\Sigma x_i}{n} = 0,000189 \quad m_{1/2} = \frac{\Sigma x_i^2}{n} = 0,160329 \quad m_{1/1} = \frac{\Sigma x_i y_i}{n} = 1,4352$$

$$x_y = 8,064468 - 0,08343 y$$

$$y = a_1 + m_{1/0} = 24,268$$

$$\bar{x} = a_2 + m_{0/1} = 6,039789$$

$$\mu_{2/0} = m_{2/0} - m_{1/0}^2 = 17,197976$$

$$\mu_{0/2} = m_{0/2} - m_{0/1}^2 = 0,160$$

$$\mu_{1/1} = m_{1/1} - m_{1/0} \cdot m_{0/1} = -1,4352$$

$$\sigma_y = \sqrt{\mu_{2/0}} = 4,1469$$

$$\sigma_x = \sqrt{\mu_{0/2}} = 0,4$$

$$\bar{r}_x = \sigma_x \sqrt{1 - r_{1/1}^2} = 0,20$$

Статистическая обработка результатов испытаний на усталость (втулки отоженные)

y_i кг/мм ²	$y_i = y_i - a_1$	y_i^2	$x_i = \lg N$	$x_i = X - a_2$	x_i^2	$x_i \cdot y_i$	$x_i + y_i$	$(x_i + y_i)^2$	
30	5,766	33,247	5,4249	-0,6878	0,47327	-3,9659	5,0782	25,788115	$Z_{1/1} = \frac{\mu_{1/1}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} = -0,9772$
30	5,766	33,247	5,4969	-0,6158	0,37921	-3,5507	5,1502	26,52456	
27,7	5,466	12,013	5,6464	-0,4663	0,211744	-1,6162	2,9997	8,9982	
25,03	0,796	0,63362	5,9385	-0,1742	0,030346	-0,13866	0,6218	0,386635	
22,4	-1,834	3,3636	6,5315	0,4188	0,17539	-0,76808	-1,4152	2,002791	
22,4	-1,834	3,3636	6,3802	0,2675	0,071556	-0,4906	-1,5665	2,453922	
20,58	-3,654	13,352	6,5315	0,4188	0,17539	-1,5303	-3,2352	10,466519	
20	-4,234	17,927	6,6345	0,5218	0,27228	-2,2093	-3,7122	13,70429	
20	-4,234	17,927	6,4281	0,3154	0,099477	-1,3354	-3,9186	15,3554	

$$\Sigma y_i = 218,11 \quad \Sigma y_i^2 = 135,08 \quad \Sigma x_i = 55,014 \quad \Sigma x_i^2 = 1,8862 \quad \Sigma x_i \cdot y_i = 15,605 \quad \Sigma x_i + y_i = 0,0022 \quad \Sigma (x_i + y_i)^2 = 105,680458$$

$$a_1 = 24,234 \quad a_2 = 6,1127$$

$$x_y = \bar{x} + r_{1/1} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y_i - \bar{y})$$

$$n = 8 \quad m_{1/0} = \frac{\Sigma y_i}{n} = 0,0004 \quad m_{2/0} = \frac{\Sigma y_i^2}{n} = 15,009$$

$$m_{0/1} = \frac{\Sigma x_i}{n} = 0,0002 \quad m_{0/2} = \frac{\Sigma x_i^2}{n} = 0,20958 \quad m_{1/1} = \frac{\Sigma x_i \cdot y_i}{n} = 1,733$$

$$x_y = 8,91149 - 0,1154664 y_i$$

$$\bar{y} = a_1 + m_{1/0} = 24,2344$$

$$\bar{x} = a_2 + m_{0/1} = 6,1129$$

$$\mu_{2/0} = m_{2/0} - m_{1/0}^2 = 15,009$$

$$\mu_{0/2} = m_{0/2} - m_{0/1}^2 = 0,20952$$

$$\mu_{1/1} = m_{1/1} - m_{1/0} \cdot m_{0/1} = -1,733$$

$$\sigma_y = \sqrt{\mu_{2/0}} = 3,8741$$

$$\sigma_x = \sqrt{\mu_{0/2}} = 0,445773$$

$$\bar{r}_{1/1} = \sigma_x \sqrt{1 - r_{1/1}^2} = 0,1$$

го рассеяния $\bar{\sigma}_x$. Последнее обстоятельство можно объяснить более благоприятными условиями возникновения и развития усталостных повреждений, вызванных действием фреттинг-коррозии наиболее твердых поверхностных слоев.

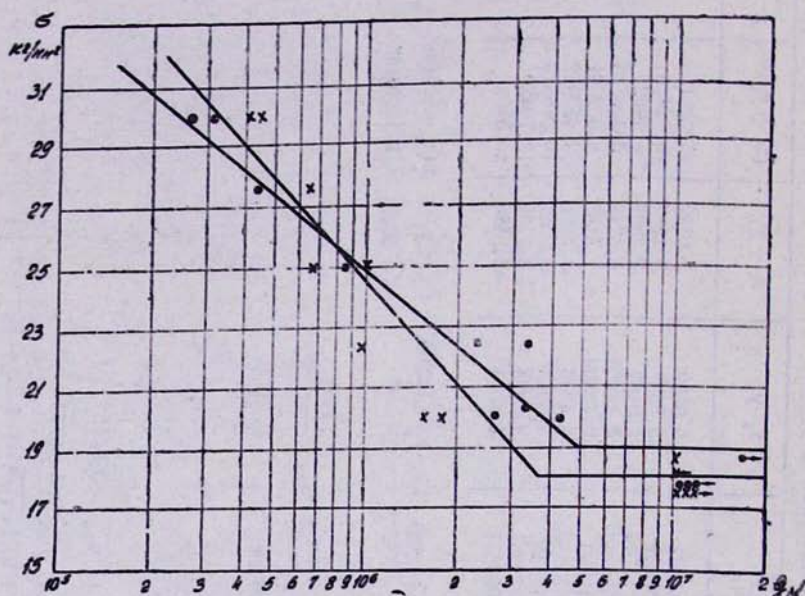


Рис. 4. Кривая усталостной прочности валиков: а) втулка упрочненная; б) втулка разупрочненная.

Полученные результаты показывают, что упрочнение поверхности отверстия охватывающей детали с целью повышения прочности прессовых соединений можно применять, практически не вызывая уменьшения усталостной прочности валов и осей в месте запрессовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Кабрин. Прочность прессовых соединений при повторнопеременной нагрузке. Машгиз, 1954.
2. А. Н. Петухов, Б. Ф. Балашов. Методы повышения усталостной прочности деталей в условиях фреттинг-коррозии. «Вестник машиностроения», 1974, № 6.
3. С. В. Серенсен, В. М. Кочаев, В. М. Шнейдерович. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Машгиз, 1963.
4. Л. Т. Балацкий, О. К. Мелехов, Г. Н. Филимонов. Усталость валов при изгибе в составе прессовых соединений с шпоночным креплением и без него. «Вестник машиностроения», 1973, № 7.
5. М. Я. Шанин. Методы статистической обработки экспериментальных данных при определении формы наклонных участков, усталостных кривых. Сборник научно-технических докладов совещания по статистическим методам прочности в машиностроении. Вып. 2, ВНИИТИ, 1964.
6. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. М., «Наука», 1971.
7. Г. К. Маркарян, Г. А. Унанян. Влияние упрочнения рабочих поверхностей деталей на прочность прессовых соединений (см. настоящий сборник).