

УДК 621.787:539.319

УЧЁТ СТЕПЕНИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

© 2009 В. А. Кирпичёв

Самарский государственный аэрокосмический университет

Установлено, что с увеличением степени концентрации напряжений коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости уменьшается.

Степень концентрации напряжений, предел выносливости, коэффициент влияния остаточных напряжений.

Рассматривалось влияние остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых поверхностным пластическим деформированием цилиндрических образцов с такими концентраторами напряжений, как надрез, галтель, напрессованная втулка и резьба. При этом концентраторы наносились на гладкие образцы как до упрочнения (галтель), так и после упрочнения (надрез и резьба) образца.

Остаточные напряжения в гладких упрочнённых образцах диаметром 10 мм определялись методом снятия части поверхности [1]. Остаточные напряжения в образцах диаметром 15, 16 и 25 мм определялись методом колец и полосок [2]. Для этого гладкие образцы предварительно расквашивались и растачивались до толщины стенки 2 мм, дополнительные напряжения при этом измерялись по методике [3] с помощью тензорезисторов. Остаточные напряжения сплошных образцов находились как сумма напряжений, вычисленных по результатам исследования колец и полосок, и дополнительных напряжений за счёт расточки.

Дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий гладкого упрочнённого образца при нанесении надреза и нарезании резьбы, определялись методом конечных элементов с использованием остаточных напряжений гладкого образца. При суммировании дополнительных напряжений с исходными получались остаточные напряжения в образце с надрезом и резьбой.

Оценка влияния сжимающих остаточных напряжений на приращение предела выносливости DS_{-1} производилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{S}_{i\dot{N}\dot{\sigma}}$ [4]

$$\Delta S_{-1} = \bar{y}_s |\bar{S}_{\text{ост}}|, \quad (1)$$

где \bar{y}_s – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по раз-

$$\text{рушению; } \bar{S}_{i\dot{N}\dot{\sigma}} = \frac{2}{p} \int_0^1 \frac{s_z(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx; \quad s_z(x) -$$

осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца (детали) с концентратором; $x = a/t_{\dot{\sigma}}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{\dot{\sigma}}$; $t_{\dot{\sigma}}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённом образце с концентратором при работе на пределе выносливости.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений a_s для надрезов и галтелей определялся по графикам работы [5], свободной резьбы (без гайки) и напрессованной втулки – по данным работы [6], резьбы с гайкой – по данным работы [7].

Надрез. Исследовались цилиндрические образцы с круговыми надрезами полукруглого профиля из стали 30ХГСА и 40Х, механические характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1. Механические характеристики материалов

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_A , МПа	d , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	536	788	18,9	65,9	1484
40Х	444	751	17,6	60,7	1330

Гладкие образцы диаметром 15 мм из стали 30ХГСА подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) по режиму: давление масла – 0,28 МПа, диаметр шариков – 2 мм, время обработки – 8 мин и обкатке роликом (ОР) по режиму: усилие обкатки – 0,5 кН, число оборотов образца – 400 об/мин, подача – 0,11 мм/об, диаметр ролика – 60 мм, профильный радиус ролика – 1,6 мм. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в гладких образцах представлено на рис. 1,а. На упрочнённые и неупрочнённые образцы безнаклёпным способом с использованием электрополирования наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ и 0,5 мм. Осевые σ_z остаточные напряжения в наименьшем сечении надрезанных образцов приведены на рис. 1,б.

Можно видеть, что в обкатанных образцах с надрезом действуют значительные сжимающие остаточные напряжения, достигающие для стали 30ХГСА 1530 МПа и существенно превышающие не только предел текучести, но и предел прочности материала. Объясняя это явление, необходимо учесть, что упрочнённый поверхностный слой ма-

териала имеет механические характеристики, превышающие средние механические характеристики всего образца (детали), так как предел текучести поверхностного слоя в результате наклёпа может достигать величины истинного сопротивления разрыву S_k . Кроме того, в работе [3] показано, что при плоском напряжённом состоянии остаточные напряжения могут быть выше предела текучести на 15 %. Следовательно, в нашем случае для стали 30ХГСА наибольшие сжимающие остаточные напряжения могут достигать 1700 МПа.

Гладкие образцы диаметром 25 мм из стали 40Х упрочнялись обкаткой роликом (ОР) по тому же режиму, что и образцы из стали 30ХГСА, с увеличением усилия обкатки до 1,0 кН. На гладкие образцы наносились надрезы радиуса $R = 1,0$ мм. Осевые остаточные напряжения σ_z гладких образцов приведены на рис. 1,а, надрезанных – на рис. 1,б.

Испытания образцов из стали 30ХГСА на усталость при чистом изгибе с вращением в случае симметричного цикла проводились на машине МУИ-6000, образцов из стали 40Х – при поперечном изгибе на машине УММ-01 [8], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ цик-

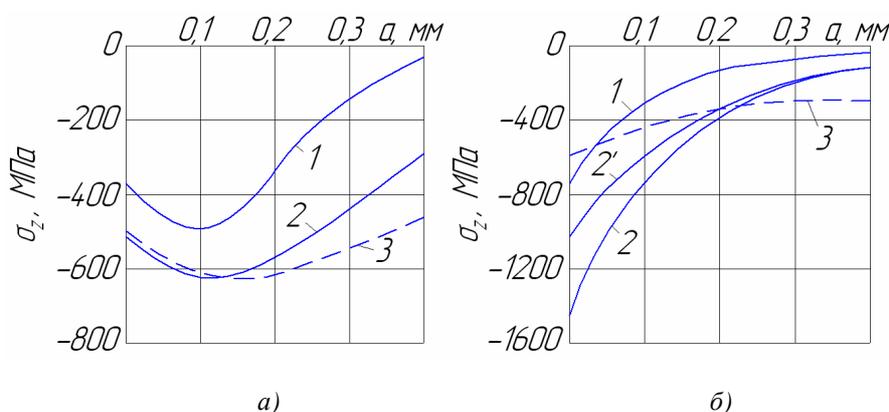


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из сталей 30ХГСА (1, 2) и 40Х (3): 1 – ГДО, $R=0,3$ мм; 2 – ОР, $R=0,3$ мм; 2' – ОР, $R=0,5$ мм; 3 – ОР, $R=1,0$ мм

лов нагружения. Значения теоретического коэффициента концентрации напряжений a_s , предела выносливости s_{-1} , критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{\text{ед}}$, критерия \bar{s}_{iN0} и коэффициента \bar{y}_s представлены в табл. 2. Из данных табл. 2 видно, что коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости при симметричном цикле \bar{y}_s в данном случае составляет в среднем 0,358, что практически совпадает со значением $\bar{y}_s = 0,36$, установленным в [9] для образцов с такой же концентрацией напряжений.

Галтель. Образцы из сталей 30ХГСА, 45, 12Х18Н10Т и сплава Д16Т (табл. 3) диаметром 10 мм в гладкой части с галтелью радиуса R подвергались обработке микрошариками (ОМ) диаметром 0,10-0,15 мм на роторной установке в течение трёх минут. Обработка образцов микрошариками осуществлялась перпендикулярно их оси, поэтому уп-

рочнялась лишь цилиндрическая часть поверхности с галтелью, а боковая поверхность оставалась в исходном состоянии, то есть без упрочнения. В связи с этим на основании работы [10] остаточные напряжения в галтели не будут заметно отличаться от напряжений гладкой части образца. Поэтому для вычисления критерия \bar{s}_{iN0} использовались эпюры осевых σ_z остаточных напряжений гладких образцов, приведенные на рис. 2.

Испытания образцов с галтелью на усталость при чистом изгибе с вращением в случае симметричного цикла проводились на машине МУИ-6000, база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения для образцов из сталей и $10 \cdot 10^6$ циклов – из сплава Д16Т. Значения коэффициента a_s , предела выносливости s_{-1} , глубины $t_{\text{ед}}$, критерия \bar{s}_{iN0} и коэффициента \bar{y}_s представлены в табл. 4. Можно видеть, что и в этом случае коэффициенты \bar{y}_s для

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Радиус надреза R , мм	a_s	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы				
				упрочняющая обработка	s_{-1} , МПа	$t_{\text{ед}}$, мм	\bar{s}_{iN0} , МПа	\bar{y}_s
30ХГСА	0,3	2,78	177,5	ГДО	255	0,309	-200	0,387
				ОР	360	0,314	-507	0,360
	0,5	2,43	180	ОР	327,5	0,300	-422	0,350
40Х	1,0	2,45	160	ОР	257,5	0,490	-110	0,334

Таблица 3. Механические характеристики материалов

Материал	$s_{0,2}$, МПа	s_A , МПа	d , %	y , %	S_k , МПа
30ХГСА	536	788	18,9	65,9	1484
сталь 45	422	710	19,7	41,4	1079
12Х18Н10Т	281	646	50,8	65,6	1444
Д16Т	410	557	15,0	23,1	728

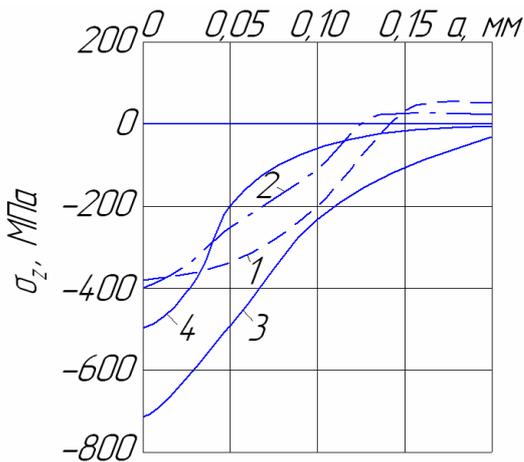


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения в гладких образцах после обработки микрошариками: 1 – 30ХГСА, 2 – сталь 45, 3 – 12Х18Н10Т, 4 – Д16Т

образцов с близкими коэффициентами концентрации отличаются незначительно.

Втулка, напрессованная на вал. Гладкие образцы диаметром 25 мм из стали 40Х (табл. 1) подвергались обкатке роликом (ОР) по режиму: усилие обкатки – 1,0 кН, число оборотов образца – 400 об/мин, подача – 0,11 мм/об, диаметр ролика – 60 мм, профильный радиус ролика – 1,6 мм. Распределение осевых остаточных напряжений представлено на рис.1,а (эпюра 3).

Испытания образцов с напрессованной втулкой на усталость при поперечном изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УММ – 01 [8], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения коэффициента a_s , предела выносливости S_{-1} , глубины $t_{\sigma 0}$, критерия $\bar{S}_{i \dot{N} 0}$ и коэффициента \bar{y}_s

представлены в табл. 4. Из данных табл. 4 следует, что для образцов с напрессованной втулкой коэффициент \bar{y}_s заметно (в 1,4 раза) меньше, чем для других концентраторов напряжений. Это объясняется тем, что через напрессованную втулку передаётся усилие и коэффициент концентрации a_s в этом случае заметно выше, чем для надреза и галтели.

Резьба. Гладкие образцы диаметром 16 мм из сталей 30ХГСА ($S_{0,2} = 920$ МПа, $S_a = 1040$ МПа, $d = 11\%$, $y = 46\%$, $S_k = 1662$ МПа) и 40Х (табл. 1) подвергались обкатке на трёхроликовом приспособлении роликами диаметром 50 мм и профильным радиусом 13 мм при числе оборотов заготовки 400 об/мин и подаче 0,43 мм/об. Усилие обкатки для образцов из стали 30ХГСА принималось равным 4,3; 6,45; 8,6 и 10,75 кН, из стали 40Х – 10,75 кН. Затем на упрочнённых и неупрочнённых образцах фасонным резцом нарезалась резьба М16х2 глубиной 1,23 мм и радиусом закругления впадин $R = 0,3$ мм. Для уменьшения остаточных напряжений от фасонного резца резьба нарезалась в несколько проходов, последний проход – с минимальной толщиной стружки. Распределение осевых S_z остаточных напряжений в гладких образцах и в образцах с резьбой представлено на рис.3.

Испытания на усталость при чистом изгибе с вращением в случае симметричного цикла резьбовых образцов из стали 30ХГСА со свободной резьбой (без гайки) проводились на машине НУ – 3000, база испытаний

Таблица 4. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Радиус надреза R, мм	a_s	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы				
				упрочняющая обработка	S_{-1} , МПа	$t_{\sigma 0}$, мм	$\bar{S}_{i \dot{N} 0}$, МПа	\bar{y}_s
30ХГСА	0,1	3,61	155	ОМ	180	0,217	-74,8	0,335
сталь 45	0,125	3,43	117,5	ОМ	152,5	0,225	-95,3	0,367
12Х18Н10Т	0,15	3,22	150	ОМ	220	0,220	-180	0,389
Д16Т	0,08	3,81	42,5	ОМ	72,5	0,220	-81,5	0,368
40Х	–	4,48	162,5	ОР	285	0,523	-484	0,253

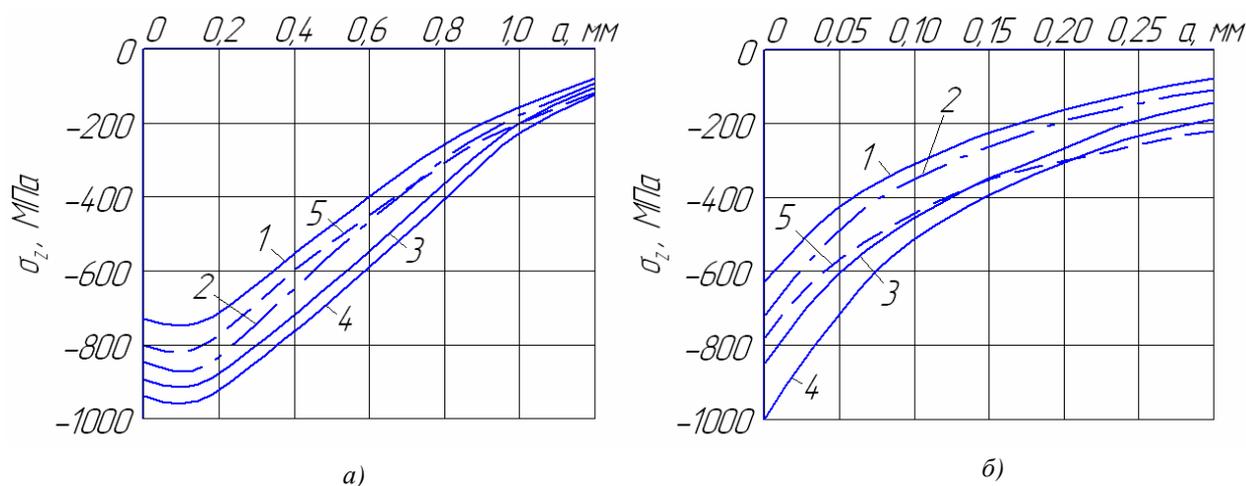


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в резьбовых образцах (б) из сталей 30ХГСА (1-4) и 40Х (5) после обкатки с усилием: 1 – 4,3 кН; 2 – 6,45 кН; 3 – 8,6 кН; 4,5 – 10,75 кН

$3 \cdot 10^6$ – циклов нагружения. Значения коэффициента a_s , предельной амплитуды S_{Ra} , глубины $t_{\text{ед}}$, критерия $\bar{S}_{i \text{ N} \bar{D}}$ и коэффициента \bar{y}_s приведены в табл. 5. И в этом случае коэффициент \bar{y}_s , равный в среднем 0,369, близок к значению 0,36 [9] для образцов с аналогичной концентрацией напряжений.

Испытания на усталость резьбовых образцов из стали 40Х с гайкой проводились при асимметричном цикле растяжения с средним напряжением S_m на испытательном комплексе УМП – 02 [8]. Из табл. 5 видно, что в этом случае коэффициент $\bar{y}_s = 0,111$ существенно меньше, чем для образцов из стали 30ХГСА со свободной резьбой (без гайки) и объясняется большей концентрацией напряжений для резьбы с гайкой [7].

Таким образом, на основании проведенных исследований и известных литературных данных установлено, что при изгибе и растяжении-сжатии в случае симметричного цикла нагружения для образцов (деталей) с концентраторами, теоретический коэффициент концентрации которых составляет $a_s = 2,4-3,8$, коэффициент \bar{y}_s в формуле (1) можно в среднем принять равным 0,36. Этот вывод справедлив для образцов из различных материалов и с различными концентраторами напряжений (надрез, галтель, свободная резьба). Если же через концентратор передается усилие, что повышает концентрацию напряжений, то коэффициент \bar{y}_s будет меньше. Так, для вала с напрессованной втулкой коэффициент $\bar{y}_s = 0,25$, для резьбовой детали с гайкой – $\bar{y}_s = 0,11$.

Таблица 5. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	a_s	Усилие обкатки, кН	S_m , МПа	S_{Ra} , МПа	$t_{\text{ед}}$, мм	$\bar{S}_{i \text{ N} \bar{D}}$, МПа	\bar{y}_s
30ХГСА	2,6	без обкатки	0	284	–	–	–
		4,3	0	375	0,296	-232	0,392
		6,45	0	384	0,302	-260	0,385
		8,6	0	398	0,294	-322	0,354
		10,75	0	409	0,301	-362	0,345
40Х	6,2	без обкатки	93	93	–	–	–
		10,75	131	131	0,298	-341	0,111

Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов значений коэффициента влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению \bar{y}_s от величины теоретического коэффициента концентрации напряжений a_s даёт для описанных в настоящем исследовании опытов следующую зависимость:

$$\bar{y}_s = 0,612 - 0,081 a_s . \quad (2)$$

Таким образом, для прогнозирования приращения предела выносливости при изгибе и растяжении-сжатии в случае симметричного цикла упрочнённых деталей с различной степенью концентрации напряжений представляется возможным использовать формулу (1), коэффициент \bar{y}_s в которой определяется зависимостью (2) по известному теоретическому коэффициенту концентрации напряжений a_s .

Библиографический список

1. Иванов С. И., Григорьева И. В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: Труды КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 32-42.
2. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. –

Куйбышев: Труды КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.

3. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
4. Павлов В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №. 8. – С. 29-32.
5. Петерсон Р. Е. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Издательство «МИР», 1977. – 304 с.
6. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
7. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые соединения. – М.: Машгиз, 1973. – 256 с.
8. Филатов Э. Я., Павловский В. Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова думка, 1985. – 92 с.
9. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
10. Павлов В. Ф., Столяров А. К. Влияние схем поверхностного деформирования на распределение остаточных напряжений в области концентратора // КуАИ. – Куйбышев. – 1985. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 12.11.85, № 1870 – В 86.

References

1. Ivanov S. I., Grigoryeva I. V. Determining residual stresses in a cylinder by removing part of the surface // Issues of aircraft structural element strength. – Kuibyshev: KuAI transactions, 1971 – issue 48. – pp. 32-42.
2. Ivanov S. I. Determining residual stress in a cylinder by the method of rings and stripes. // Residual stresses: KuAI transactions, 1971 – issue 53. – pp. 32-42.
3. Birger I. A. Residual stresses. – Moscow: Mashgis, 1963 – 232 p.
4. Pavlov V. F. Relation between residual stress and endurance limit in case of bending in conditions of stress concentration // Izvestiya

vuzov. Machinostroyeniye. – 1986. – No. 8. – pp. 29-32.

5. Peterson R. Ye. Stress concentration coefficients. – Moscow: Publishing house "MIR", 1977. – 304 pp.
6. Serensen S. V., Kogayev V. P., Shneiderovitch R. M. Bearing capacity and strength analysis of machine elements. – Moscow: Machinostroyeniye, 1975. – 488 pp.
7. Birger I. A., Iosilevitch G. B. Threaded connections. – Moscow: Mashgiz, 1973. – 256 pp.
8. Filatov E. Ya., Pavlovsky V. E. A universal machine complex for fatigue tests of materials

and structures. – Kiev: Naukova dumka, 1985. – 92 pp.

9. Pavlov V. F., Kirpichyov V. A., Ivanov V. B. Residual stress and fatigue strength of strengthened part with stress concentrators. – Samara: Publishing house of Samara Science Centre Russian Academy of Science, 2008. – 64 pp.

10. Pavlov V. F., Stolyarov A. K. The effect of surface deformation patterns on residual stress distribution in the concentrator area // KuAI. – Kuibyshev. – 1985. – 7 pp. – Dep. at All-Russian Institute of Scientific and Technical Information 12.11.85. No. 1870-B86.

TAKING ACCOUNT OF STRESS CONCENTRATION DEGREE WHEN FORECASTING THE FATIGUE STRENGTH OF STRENGTHENED PART

© 2009 V. A. Kirpichyov

Samara State Aerospace University

It is established that the coefficient of residual stress influence on the endurance limit decreases as the stress concentration degree increases.

Stress concentration degree, endurance limit, residual stress influence coefficient.

Информация об авторах

Кирпи́чёв Виктор Алексе́евич, доцент кафедры сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет, e-mail: sopromat@ssau.ru, область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Kirpichyov Viktor Alexeyevitch, associate professor of the department of strength of materials, candidate of technical sciences, associate professor, Samara State Aerospace University, e-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stress.