

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛЬНАЯ АМПЛИТУДА УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ

© 2006 В. А. Кирпичев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Изучено влияние сжимающих остаточных напряжений на предельную амплитуду упрочненных деталей с концентраторами при растяжении-сжатии в случае асимметричного цикла нагружения. Оценка влияния осуществлялась с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. Предложена методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений упрочненных и неупрочненных деталей с концентраторами, на основании которых представляется возможность прогнозирования приращения предельной амплитуды деталей за счет упрочнения. Экспериментальные данные согласуются с расчетными.

Значительная группа деталей испытывает асимметричный цикл нагружения. Например, тяги, резьбовые детали работают при переменных нагрузках со средними растягивающими напряжениями. Поэтому целесообразно исследовать совместное влияние остаточных и средних напряжений на предельную амплитуду цикла и установить возможность использования применительно к такому нагружению критерия остаточных напряжений [1]:

$$\bar{s}_{ocm} = \frac{2}{p} \int_0^1 \frac{s_z(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad (1)$$

где $s_z(x)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали по толщине поверхностного слоя a ; $x = a/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Приращение предела выносливости в случае симметричного цикла Δs_{-1} вычисляется по формуле

$$\Delta s_{-1} = \bar{y}_s |\bar{s}_{ocm}|, \quad (2)$$

где \bar{y}_s – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению, который при изгибе и растяжении-сжатии составляет в среднем 0,36.

Опыты проводились на образцах диаметром 10 мм из нормализованной стали 45 ($s_s = 610$ МПа, $s_T = 396$ МПа, $d = 24,2$ %, $y = 51,8$ %, $S_k = 1010$ МПа, $s_{-1p} = 240$ МПа). Половина образцов после изготовления подвергалась упрочнению на гидродробеструйной установке в течение 8 минут стальными шариками диаметром 2 мм при давлении масла 0,28 МПа. На упрочненные и неупрочненные образцы безнаклепным способом наносились надрезы полукруглого профиля радиуса 0,3 мм. Распределение остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя гладких и надрезанных образцов представлено на рис. 1.

Испытания образцов на усталость при растяжении-сжатии в случае симметричного и асимметричного циклов проводились на

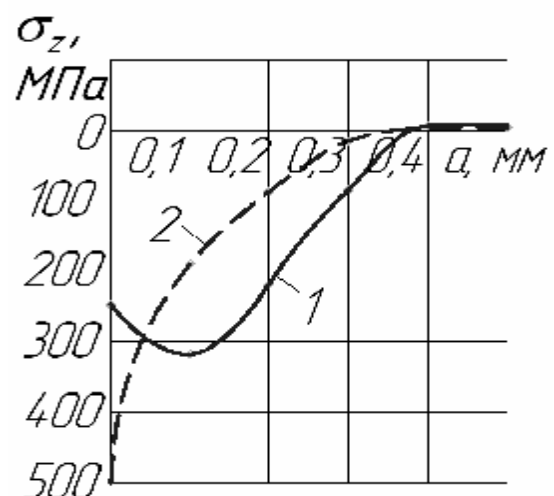


Рис. 1. Остаточные напряжения в гладких образцах (1) и в образцах с надрезом (2) после гидродробеструйной обработки

машине УММ-01. Значение предельной амплитуды цикла s_{aR} при различных значениях средних напряжений s_m , а также результаты измерения $t_{кр}$ и вычисления \bar{s}_{ocm} и \bar{y}_s представлены в табл. 1.

Можно заметить, что с увеличением среднего напряжения s_m предельная амплитуда цикла упрочненных образцов уменьшается. Уменьшается s_{aR} и для неупрочненных образцов, но менее интенсивно. Следует отметить, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ не зависит от среднего напряжения цикла.

Из данных табл. 1 видно, что с увеличением среднего напряжения коэффициент \bar{y}_s уменьшается. Возникает вопрос об оценке приращения предельной амплитуды с помощью критерия остаточных напряжений \bar{s}_{ocm} , вычисленного согласно (1). Предлагается использовать диаграмму Ганна [2, 3] предельных амплитуд цикла напряжений $s_a = s_a(s_m)$ (рис. 2).

Построим диаграмму для материала. Предел выносливости исследованной стали 45 при растяжении-сжатии в случае симметричного цикла (s_{-1p}) составляет 240 МПа, который откладывается по оси s_a . По оси s_m откладывается не предел прочности s_σ , как это обычно принято [3], а сопротивление отрыву $S_\kappa = 1010$ МПа согласно работе [4]. Проводится схематизированная по линейному закону диаграмма предельных амплитуд цикла для материала (прямая 1). Справа ди-

аграмма ограничивается условием текучести (прямая 5).

Далее строится диаграмма (ломаная прямая 2, 3) для упрочненной детали с концентратором напряжений [3]. Левая часть (прямая 2) этой диаграммы проводится параллельно диаграмме 1 материала с уменьшением амплитуды в K_s раз, где K_s – эффективный коэффициент концентрации напряжений. В рассматриваемом случае $K_s = 1,55$, и тогда $s_{-1p}^{dem} = 154$ МПа. Точка А возникновения пластических деформаций в концентраторе находится на пересечении прямых 2 и 6. Штриховая прямая 6 ограничивает текучесть. Далее предполагается, что среднее напряжение в надрезе с ростом статической нагрузки из-за течения материала не увеличивается, и поэтому правая часть (прямая 3) диаграммы предельных амплитуд цикла проводится параллельно оси s_m .

Для построения диаграммы предельных амплитуд цикла упрочненной детали (прямая 4) согласно (2) вычисляется предел выносливости детали с остаточными напряжениями. Для $\bar{y}_s = 0,36$ и $\bar{s}_{ocm} = -134$ МПа величина $s_{-1p}^{dem} = 202$ МПа. Эта величина откладывается по оси s_a , и проводится прямая 4, параллельная диаграмме материала. Результатом будет диаграмма предельных амплитуд цикла для упрочненной детали с концентратором. Из рис. 2, на котором точками показаны экспериментальные данные, следует, что они согласуются с принятой диаграммой предельных амплитуд цикла. Поэтому предложенный подход может быть использован на практике при проведении расчетов.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

s_m , МПа	Неупрочненные образцы s_{aR} , МПа	Упрочненные образцы			
		s_{aR} , МПа	$t_{кр}$, мм	\bar{s}_{ocm} , МПа	\bar{y}_s
0	152,5	200	0,206	-134	0,355
50	137,5	–	–	–	–
100	135	180	0,205	-134	0,336
200	132,5	155	0,207	-134	0,167

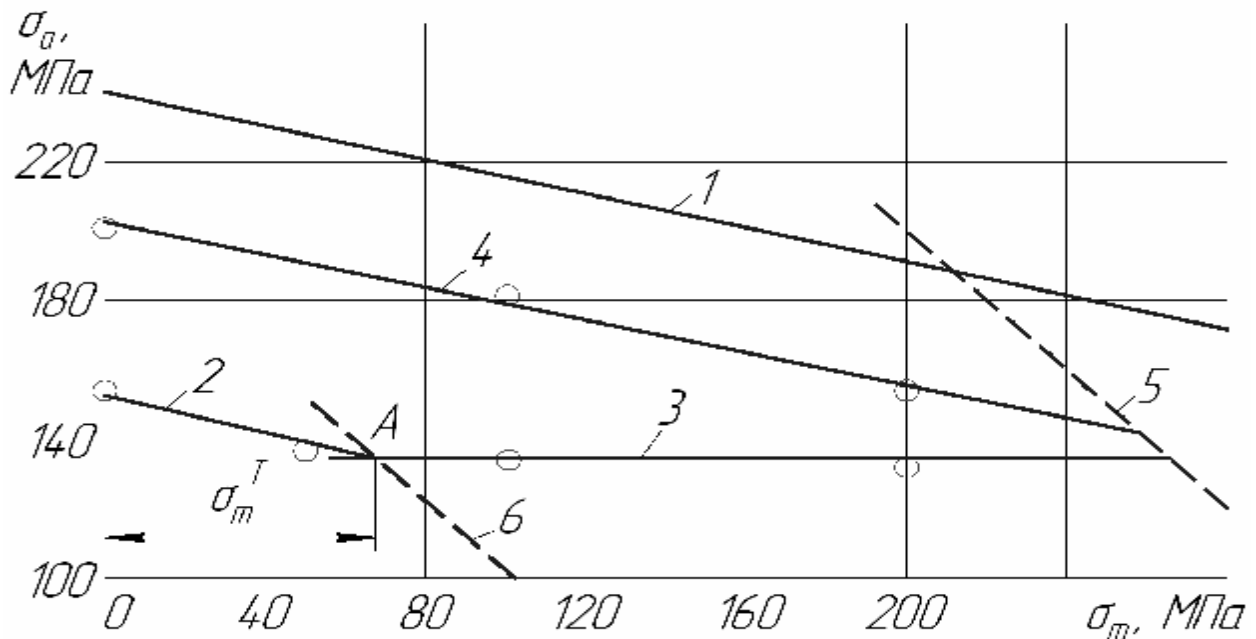


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд цикла: 1 – материала; 2, 3 – неупрочненной детали; 4 – упрочненной детали; 5, 6 – по текучести

Из геометрических соображений получим формулу для коэффициента $\bar{Y}_s^{(m)}$ при среднем напряжении цикла

$$\bar{Y}_s^{(m)} = \bar{Y}_s - \frac{s_{-1p}(s_m - s_m^T)}{S_\kappa \cdot \bar{s}_{ocm}}, \quad (3)$$

где s_m^T – среднее напряжение (рис. 2.), при котором в концентраторе без остаточных напряжений появляются первые пластические деформации. Формула (3) справедлива при $s_m > s_m^T$. При $s_m \leq s_m^T$ коэффициент $\bar{Y}_s^{(m)} = 0,36$ для случая, когда через концентратор не передается усилие. Значение сопротивления отрыва S_κ вычисляется по формуле [5]:

$$S_\kappa = s_\sigma(1 + 1,35y), \quad (4)$$

где s_σ – предел прочности детали, y – относительное остаточное сужение после разрушения (в долях).

Таким образом, по известным пределу выносливости материала s_{-1p} , сопротивлению отрыву S_κ , эффективному коэффициенту концентрации напряжений K_s , критерию

остаточных напряжений \bar{s}_{ocm} и коэффициенту \bar{Y}_s можно построить диаграмму предельных амплитуд цикла упрочненной детали описанным выше способом. Для определения приращения предельной амплитуды цикла при любом среднем напряжении можно воспользоваться (2), в которой \bar{Y}_s определяется по (3).

Список литературы

1. Павлов В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений// Известия вузов. Машиностроение. – 1986. № 8. – С. 29-32.
2. Ромашов Р. В., Федоров В. В., Соболев В. Л. О корреляционной связи пределов выносливости металлов с характеристиками статической прочности// Проблемы прочности. – 1980. № 11. – С.24-27.
3. Форрест П. Усталость металлов. - М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
4. Федоров В. В., Шиначев А. М., Цыганов С. Г. Зависимость для определения предела выносливости с учетом асимметрии цикла// Оптимизация технологических процессов по критериям прочности. - Уфа: УАИ, 1986. – С. 26-30.

5. Давиденков Н. Н., Спиридонова Н. И. стянутого образца// Заводская лаборатория.
Анализ напряженного состояния в шейке ра- – 1945. №6. – С.583-593.

**RESIDUAL STRESSES AND LIMITING AMPLITUDE OF STRENGTHENED
PARTS WITH CONCENTRATORS IN CASE OF ASYMMETRIC CYCLE**

© 2006 V. A. Kirpichyov

Samara State Aerospace University

The influence of compressive residual stresses on the limiting amplitude of strengthened parts with concentrators under expansion-compression in case of asymmetric loading cycle is studied. The influence was estimated using the criterion of constructing a diagram of limiting amplitudes of the stress cycle for both strengthened and non-strengthened parts with concentrators are proposed. It makes possible to predict the increment of the limiting amplitude due to the parts being strengthened. Experimental data are in good agreement with the rated data.