

рые и могут быть приняты в качестве верхней оценки. Практическую оценку снизу, в запас устойчивости, при $\theta_0 = \theta'_0$ можно проводить по известным формулам для равномерного критического давления. Для косинусоидальных нагрузок указанные оценки справедливы и при $\theta_0 > \theta'_0$. Отметим также, что размер площадок нагружения в осевом направлении не влияет на эти качественные особенности.

Таким образом, на основе полученных результатов представляется возможным уже на стадии анализа напряженно-деформированного состояния альтернативных вариантов оболочечных конструкций определить значения «рациональных» θ'_0 и «опасных» θ''_0 углов нагружения, при которых устойчивость оболочки соответственно минимальна и максимальна для данного вида нагрузки. При заданных параметрах конструкции можно назначить угол нагружения θ_0 так, чтобы он был близок к расчетному θ'_0 , а затем достаточно просто провести верхнюю и нижнюю оценки критического уровня нагрузки. В конечном итоге принятое на этапе проектирования решение можно проверить, воспользовавшись представленным выше алгоритмом точного решения задачи устойчивости.

Л и т е р а т у р а

1. Кабанов В.В. Устойчивость неоднородных цилиндрических оболочек. - М.: Машиностроение, 1982. - 256 с.
2. Махнович С.В., Хищенко Д.М. Исследование устойчивости цилиндрических оболочек под действием несесимметричного давления. - В кн.: Динамика и прочность конструкций. - Челябинск: ЧПИ, 1982, с. 65-73.

УДК 621.787:539.319

С.И.Иванов, В.Ф.Павлов, А.А.Прохоров

РОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СОПРОТИВЛЕНИИ УСТАЛОСТИ ПРИ КРУЧЕНИИ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Все возрастающие требования к надежности и долговечности конструкций приводят к необходимости максимального использования всех резервов повышения прочностных характеристик деталей. Так как разрушение деталей машин при эксплуатации, как правило, начинается с поверхности, сжимающие остаточные напряжения, возникающие в поверхностных слоях детали, являются одним из существенных факторов по-

вышении сопротивления усталости /1/.

Характерной деформацией для большой группы деталей машин является переменное кручение. Количественная оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости в условиях концентрации известна только в случае изгиба /2/, при кручении имеются лишь качественные оценки /3/. В связи с этим целью настоящей работы было установление зависимости между величиной остаточных напряжений и пределом выносливости при кручении.

Исследования проводили на образцах из сталей 40 и 3И96Г, являющихся соответственно прототипом сталей 38ХА, 38ХГСА, 38ХНДА, 40Х, 40ХНМА, 40Х2ММА, 45Х, 45ХНМФА и аналогом сталей 12Х2Н4А, 15ХНГ2ВА, 18Х2Н4МА – основных материалов для изготовления валов, а также на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95, широко применяемого для изготовления силовых элементов авиационных конструкций.

Образцы для усталостных испытаний изготавливали из прутков диаметром 30 мм одной плавки. Повышенные требования к точности определения предела выносливости при кручении /3/ предопределили тщательный отбор заготовок по механическим свойствам. Разброс прочностных характеристик прутков, использованных для изготовления образцов, не превышал 3 %. Механические характеристики исследуемых материалов приведены в таблице 1.

Использовали гладкие цилиндрические образцы диаметром рабочей части 12 мм (рис.1) и аналогичные образцы с концентратором напряжений полукруглой формы (рис.2). Одну половину гладких образцов после точения подвергали гидродробеструйной обработке по режимам, приведенным в таблице 2. Другую половину электрополировали на глубину 100 мкм для удаления наклепанного точением слоя и, следовательно, разгрузки от остаточных напряжений. На образцы с остаточными напряжениями и без них наносили надрезы резцом полукруглого профиля радиуса 0,25 мм с последующим электрополированием на глубину 50 мкм для удаления наклепанного резцом слоя. В итоге после электрополирования получали полукруглый надрез с радиусом 0,3 мм.

Предел выносливости при кручении до полного разрушения определяли методом "лестницы" на машине УММ-01 при симметричном цикле на базе $3 \cdot 10^6$ циклов с частотой нагружения 35 гц. Результаты усталостных испытаний, приведенные в таблице 3, показывают, что остаточные напряжения приводят к увеличению предела выносливости при кручении как гладких, так и надрезанных образцов. Особенно заметно это увеличение для образцов из сплава В95. На рис.3 в качестве примера

Таблица 1

Материал	Механические характеристики			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Сталь 40	580	322	30,8	52,1
ЭИ 96I	913	769	16,9	65,1
В 95	649	593	8,8	16,4

Таблица 2

Материал	Режимы гидродробеструйной обработки		
	давление масла, МПа	экспозиция, мин	диаметр дроби, мм
Сталь 40	0,25	8	2
ЭИ 96I	0,29	8	2
В 95	0,19	8	2

Таблица 3

Материал	Концентратор	Предел выносливости, τ_{-1} , МПа		$\sigma_{ост}$, МПа	$\psi = \frac{\Delta\tau_{-1}}{ \sigma_{ост} }$
		без остаточных напряжений	с остаточными напряжениями		
Сталь 40	гладкие	177,5	187	-	-
Сталь 40	$R = 0,3$ мм	150	166	- 200	0,08
ЭИ 96I	$R = 0,3$ мм	244	300	- 790	0,07
В 95	$R = 0,3$ мм	37,5	72,5	- 510	0,069

представлены результаты усталостных испытаний надрезанных образцов из стали 40. Можно видеть, что остаточные напряжения не только увеличивают предел выносливости, но и существенно уменьшают его рассеяние.

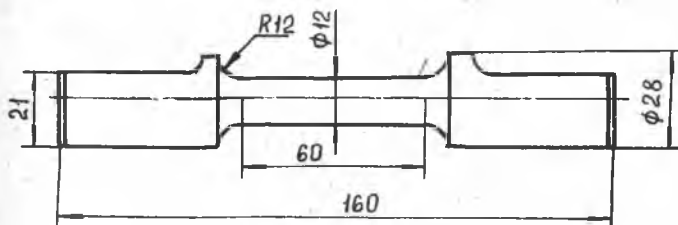


Рис. 1

Осевые σ_z и окружные σ_θ остаточные напряжения в поверхностном слое гладких образцов после гидродробеструйной обработки определяли методом удаления половины цилиндрической поверхности образца /4/. Достоверность измерения остаточных напряжений подтверждалась на идентично упрочненных втулках методом колец и полосок /5/, имеющим разрешающую способность на порядок выше, чем метод удаления частиц цилиндрической поверхности. Эпюры остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя приведены на рис. 4.

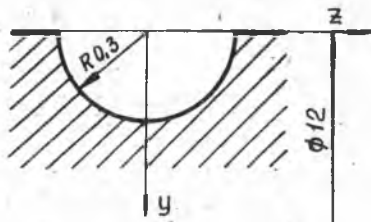


Рис. 2

Изучение характера изломов показало, что зарождение усталостной трещины в образцах с остаточными напряжениями происходило по дну надреза в плоскости, перпендикулярной оси образца. Поэтому для анализа прочности при переменном кручении образцов с концентраторами использовали осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении.

Дополнительные осевые остаточные напряжения, возникающие на дне надреза в результате перераспределения остаточных усилий гладкого образца после нанесения кольцевого надреза полукруглого профиля, определяли по формуле работы /6/:

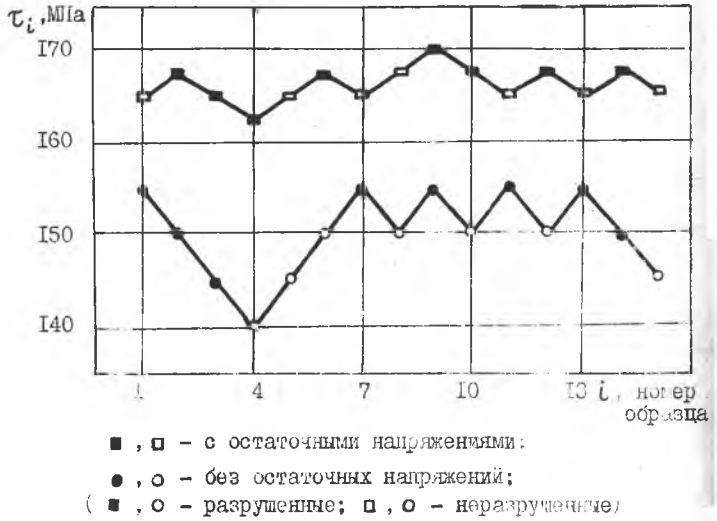


Рис. 3

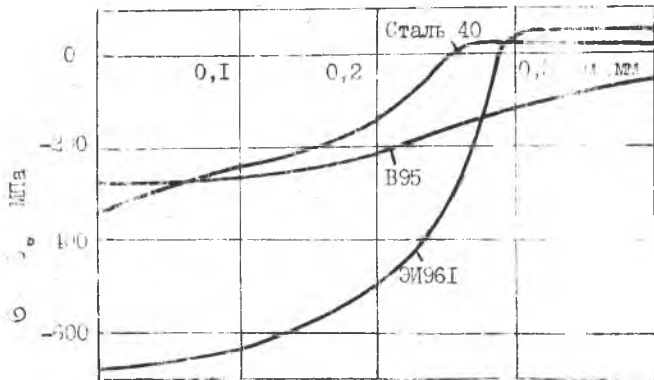


Рис. 4

$$\sigma_{z \partial} = \int_0^1 \left[\frac{4}{\pi \sqrt{1-\xi^2}} + 0,0925 \sqrt{1-\xi^2} \right] \sigma_z(\xi) d\xi,$$

где $\xi = \frac{y}{R}$ - расстояние от цилиндрической поверхности до текущего слоя, выраженное в долях R , R - радиус надреза, $\sigma_z(\xi)$ - осевое остаточное напряжение гладкого образца.

Складывая дополнительные остаточные напряжения с исходными, получали остаточные напряжения на дне надреза $\sigma_{ост}$, значения которых приведены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 следует, что коэффициент влияния остаточных напряжений ψ_τ при кручении в условиях концентрации, равный отношению приращения предела выносливости ΔT_{-1} к величине остаточного напряжения ($\sigma_{ост}$), составляет в среднем 0,072 и практически не зависит ни от материала, ни от величины остаточного напряжения. Сравнивая $\psi_\tau = 0,072$ с аналогичной величиной при изгибе $\psi_\sigma = 0,175/2$, видим, что влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении заметно ниже.

Таким образом, проведенные исследования показывают целесообразность поверхностного упрочнения деталей, работающих на кручение, при этом в прочностных расчетах таких деталей можно использовать полученное на основании эксперимента значение коэффициента $\psi_\tau = 0,072$.

Л и т е р а т у р а

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. - М.: Машгиз, 1963. - 232 с.
2. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность. - Проблемы прочности, 1976, № 5, с. 25-27.
3. Куликов О.О. Исследование эффективности поверхностных методов упрочнения деталей, подвергающихся циклическому кручению. - В сб.: Новые исследования в области машиностроительных материалов. - Труды ЦНИИТМАШ, кн. 49. - М.: Машгиз, 1952, с. 118-143.
4. Иванов С.И., Григорьева И.В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. - Куйбышев, КуАИ, 1971, вып. 48, с. 179-183.
5. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. - В кн.: Остаточные напряжения. - Куйбы-

шев, КуАИ, 1971, вып. 53, с. 32-42.

6. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. - Куйбышев, КуАИ, 1974, с. 88-95.

УДК 539.4:620.191

А.В.Кириллов, А.С.Мостовой

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ТРЕЩИН МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

Целью настоящей работы является уточнение известной формулы линейной механики разрушения для определения значений коэффициента интенсивности напряжений при трещинах малых размеров. Для пластины конечной ширины с центральной сквозной трещиной (рассматривается трещина нормального отрыва) коэффициент интенсивности напряжений определяется, как известно, из выражения

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \ell} f(2\ell/W), \quad (1)$$

где σ - напряжение брутто, ℓ - полудлина трещины, W - ширина пластины, $f(2\ell/W)$ - поправочная функция, учитывающая конечность ширины пластины $/I/$.

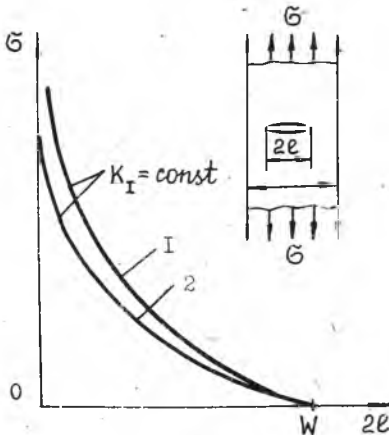


Рис. 1

На рис.1 кривая 1 представляет зависимость между длиной трещины и соответствующим значением напряжения σ при постоянном значении K_I . Для малых длин трещин использование формулы (1) приводит к неограниченному возрастанию σ , которое, однако, не должно превышать значения временного сопротивления разрыву σ_B материала.

В некоторых работах [2... 4/ для описания напряженного состояния вблизи малых трещин