

УДК 621.787

С.И.Иванов, С.М.Лежин, В.Ф.Павлов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ГАЛТЕЛЯХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Исследовались остаточные напряжения в галтелях деталей сложной формы из сплава В93 (рис. 1, 2) методом удаления слоев на продольных и поперечных образцах, вырезанных из деталей. Форма образцов соответствовала форме изучаемой поверхности детали.

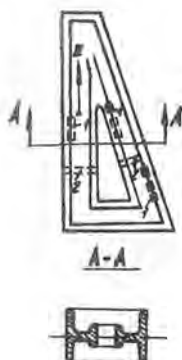


Рис. 1.

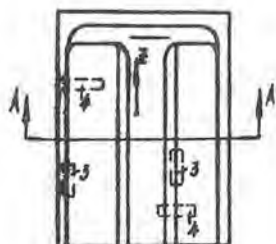


Рис. 2.

При определении остаточных напряжений галтели, по которой осуществляется переход от полок к стенкам или от одних стенок к другим, вырезались два образца, обозначенные на рисунках 1, 2 цифрами 1 и 2, 3 и 4. Продольные образцы 1 и 3 являются полосками с симметричными поперечными сечениями. На рисунке 3 изображено поперечное сечение образца 1, на рисунке 4 - образца 3.

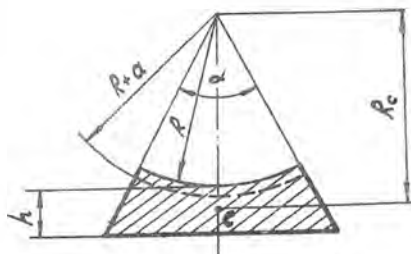


Рис. 3.

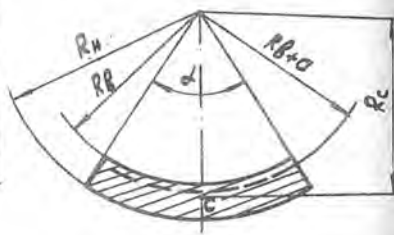


Рис. 4.

Дополнительные осевые напряжения, внесенные при отделении образцов I и 3 от детали, оценивались с помощью тензорезисторов, наклеенных на поверхности галтели по следующей формуле:

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_z + \mu \varepsilon_\theta), \quad (1)$$

ε_z , ε_θ - относительные деформации образцов в осевом и окружном направлениях за счет вырезки из детали; E - модуль продольной упругости; μ - коэффициент Пуассона.

Дополнительные окружные напряжения для образцов 2 и 4:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_\theta + \mu \varepsilon_z), \quad (2)$$

ε_z , ε_θ - относительные деформации образцов в осевом и окружном направлениях за счет вырезки из детали.

Исследование приведенных в статье деталей показало, что дополнительные остаточные напряжения малы, и в дальнейшем они не учитывались.

Методом анодного растворения проводили удаление верхних слоев поверхности полоски и измеряли ее прогибы.

Применяя описанный в работах [1], [2], [3] метод, получим следующую формулу для остаточных напряжений по результатам исследования полоски I (рис. 3):

$$\sigma_{zn} = \frac{4EJ}{l^2 R (R \sin \frac{\alpha}{2} - R_c \frac{\alpha}{2})} \frac{df(a)}{da} \quad (3)$$

Здесь обозначено: $\sigma_{zn} = \sigma_z - \mu \sigma_\theta$

$$J = \frac{1}{2} (R+h)^4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{R^4}{8} (\alpha + \sin \alpha) - \frac{8}{9} \frac{[(R+h)^3 - R^3 \cos \frac{\alpha}{2}]^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{2(R+h)^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - R^2 \alpha} -$$

- момент инерции поперечного сечения полоски относительно нейтральной оси;

$$R_c = \frac{4}{3} \frac{(R+h)^3 - R^3 \cos \frac{\alpha}{2}}{2(R+h)^2 - R^2 \alpha \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}} \quad - \text{ радиус центра тяжести поперечного сечения полоски; } \sigma_{\text{н}}, \sigma_{\text{в}} - \text{ осевое и окружное напряжения галтели; } R - \text{ радиус галтели; } h - \text{ наименьшая толщина поперечного сечения полоски; } \alpha - \text{ центральный угол поперечного сечения; } l - \text{ длина полоски; } f(a) - \text{ прогиб полоски в середине длины после удаления слоя толщиной } a.$$

Для продольного образца 3 (см. рис. 2 и 4) расчетную формулу можно взять из работы [4]:

$$\sigma_{\text{нн}} = \frac{8E}{l^2 R_B [2R_B \sin \frac{\alpha}{2} - R_c \alpha]} \left[f(a) \frac{dy}{da} + y \frac{df(a)}{da} \right], \quad (4)$$

где

$$y = \frac{\alpha + \sin \alpha}{8} (R_H^4 - R_B^4) - \frac{8}{9} \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2} (R_H^3 - R_B^3)^2}{\alpha (R_H^2 - R_B^2)}$$

- момент инерции поперечного сечения полоски относительно нейтральной оси;

$$R_c = \frac{4}{3} \frac{\sin \frac{\alpha}{2} (R_H^3 - R_B^3)}{\alpha (R_H^2 - R_B^2)} \quad - \text{ радиус центра тяжести поперечного сечения полоски; } R_B - \text{ радиус галтели; } R_H - \text{ наружный радиус поперечного сечения образца.}$$

Формулы (3) и (4) применимы лишь при определении напряжений в тонком слое возле поверхности галтели. Положительными здесь считаются прогибы, направленные в сторону удаляемых слоев.

Поперечный образец 2 с прикрепленными к нему удлинительными для измерения перемещений показан на рисунке 5. Перемещение Δ_0 возникает после удаления материала образца со стороны, обратной галтели, до образования цилиндрической поверхности радиуса $R+h$. Считая что Δ_0 связано с изгибом части образца 2, получим следующее выражение для оценки дополнительного

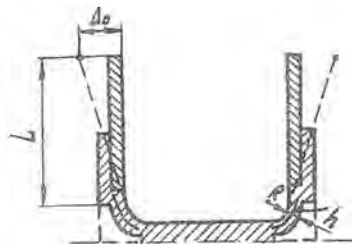


Рис. 5

для оценки дополнительного

напряжения на поверхности галтели:

$$\sigma_{\text{внд}} = E \frac{\Delta_0 h}{2(R + \frac{h}{2}) [L \frac{\pi}{2} + (R + \frac{h}{2})]} \quad (5)$$

где h - толщина образца после удаления части материала; R - радиус галтели; L - размер удлинителя.

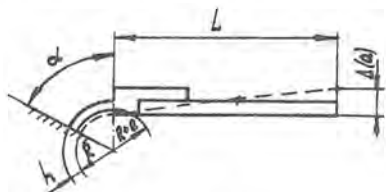


Рис. 6.

Эти дополнительные напряжения оказались также малыми (порядка 15 МПа). Образец 2 разрезался на две части для исследования каждой галтели в отдельности. Дальнейшее исследование заключалось в удалении анодным растворением поверхностных слоев галтели в пределах угла α и измерении перемещений образца $\Delta(a)$ (рис. 6). Аналогично исследовались и образцы 4. Связь между $\Delta(a)$ и остаточными напряжениями устанавливалась методом, описанным в работах [1], [3]. Окончательная формула для определения остаточных напряжений в тонком слое возле поверхности галтели имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{E h^2}{6(R + \frac{h}{2}) [L \alpha + (R + \frac{h}{2})(1 - \cos \alpha)]} \frac{d\Delta(a)}{da} \quad (6)$$

где

$$\sigma_{\text{вн}} = \sigma_{\theta} - \mu \sigma_z.$$

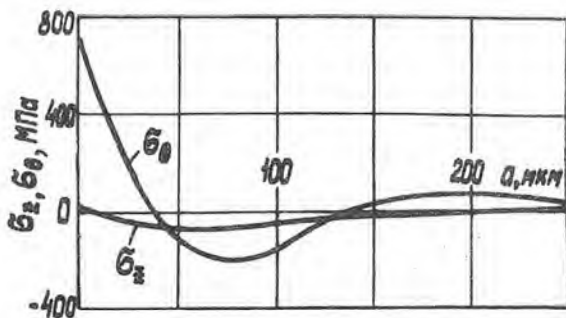


Рис. 7.

Результаты вычислений по формулам (1)-(4) и (6) использовались для определения остаточных напряжений галтели:

$$\sigma_1 = \frac{1}{1-\mu^2} (\sigma_{zn} + \mu \sigma_{\theta n}), \quad \sigma_{\theta} = \frac{1}{1-\mu^2} (\sigma_{\theta n} + \mu \sigma_{zn}).$$

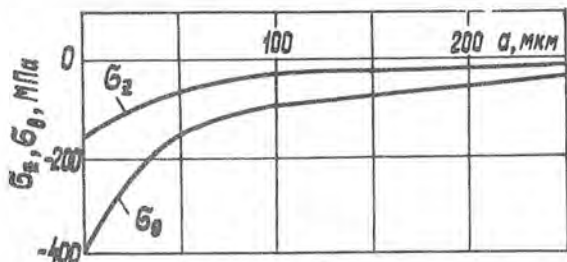


Рис. 8

При исследовании указанных деталей перемещения образцов при удалении слоев достигали 150-200 мкм. Остаточные напряжения возле поверхности галтели были как растягивающими, так и сжимающими, о чем свидетельствуют эпюры на рис. 7 и 8, полученные в отдельных точках деталей. Наблюдалось существенное рассеяние остаточных напряжений не только в различных деталях, но и в пределах одной детали. Наличие больших растягивающих остаточных напряжений является одной из причин самопроизвольного растрескивания деталей из сплава В93 в местах концентрации.

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. Определение остаточных напряжений в пластинах методом полосок. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев, изд. КуАИ, вып. 48, 1971, с. 139-152.
3. Иванов С.И. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндра. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев, изд. КуАИ, вып. 48, 1971, с. 153-168.
4. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. - В кн.: Остаточные напряжения. Куйбышев, изд. КуАИ, вып. 53, 1971, с. 32-42.