

С.И.Иванов, С.А.Букатый

ИСКАЖЕНИЕ ФОРМЫ КОЛЬЦЕВОЙ ДЕТАЛИ ПОСЛЕ УПРОЧНЕНИЯ  
ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

В последнее время получили широкое распространение отделочно-упрочняющие обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). После обработки ППД наряду с повышением прочности и чистоты поверхности происходит нежелательное, а в ряде случаев недопустимое искажение формы детали, связанное с образованием в ней остаточных напряжений. Имея расчетный способ оценки искажения формы, можно это искажение заранее сравнить с требуемой точностью и произвести необходимую коррекцию формы детали еще в стадии проектирования. В настоящей статье рассматривается задача об искажении формы кольцевых деталей (колец подшипников, проставок и трактовых колец авиадвигателей и др.).

Обратимся сначала к прямому брусу (рис.1), в котором после упрочнения возникают остаточные напряжения  $\sigma_1(z, \xi)$  и  $\sigma_2(z, \xi)$ , вызванные пластической деформацией в поверхностном слое малой толщины  $a(z)$ . Рассматривая действие пластически деформированного слоя на деталь и учитывая самоуравновешенность остаточных усилий, получим следующие зависимости для абсолютного удлинения бруса  $\Delta l$  и его кривизн  $\varkappa_u$  и  $\varkappa_v$  в главных плоскостях жесткости:

$$\begin{aligned}\Delta l &= -\frac{l}{EF} \oint_S \int_0^a (\sigma_2 - \mu \sigma_1) d\xi dz \\ \varkappa_u &= \frac{1}{EJ_v} \oint_S \int_0^a u (\sigma_2 - \mu \sigma_1) d\xi dz \\ \varkappa_v &= \frac{1}{EJ_u} \oint_S \int_0^a v (\sigma_2 - \mu \sigma_1) d\xi dz,\end{aligned}\quad (I)$$

где наружные интегралы вычисляются по контуру поперечного сечения бруса.

Рассмотрим теперь кольцевую деталь (рис. 2) с остаточными напряжениями  $\sigma_t$ ,  $\sigma_s$ , которые изменяются по толщине слоя и вдоль контура поперечного сечения, но постоянны в окружном направлении. В силу осевой симметрии после упрочнения детали могут произойти лишь изменение диаметра  $\Delta D$  и поворот каждого поперечного сечения в своей плоскости на одинаковый угол  $\psi$ .

Для определения первого перемещения применим к каждому элементу кольца  $R d\varphi$  формулу прямого бруса (1):

$$d(\Delta \ell) = -\frac{R d\varphi}{EF} \oint_s \int_0^a (\sigma_t - \mu \sigma_s) d\xi ds. \quad (2)$$

Сложив приращение длин элементов и выразив новую длину оси кольца через приращение диаметра, получим

$$\Delta D = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d(\Delta \ell)}{d\varphi} d\varphi = -\frac{2R}{EF} \oint_s \int_0^a (\sigma_t - \mu \sigma_s) d\xi ds. \quad (3)$$

При отыскании угла поворота  $\psi$  будем считать, что упрочняется разрезанное кольцо. После упрочнения его концы получают взаимные перемещения, которые нужно устранить, приложив к концам нагрузки, действующие в неразрезанном кольце. Вычисляя на каждом из этих этапов угловые перемещения и складывая их, получим значение  $\psi$  для упрочненного неразрезанного кольца.

Взаимные перемещения концов разрезанного кольца после упрочнения определим с помощью интеграла Мора

$$\delta = \int_0^{2\pi} (\Delta x_u M_{v1} + \Delta x_v M_{u1}) R d\varphi, \quad (4)$$

где  $M_{v1}$ ,  $M_{u1}$  - изгибающие моменты относительно главных центральных осей поперечного сечения кольца, вызванные единичными нагрузками, соответствующими искомому перемещению.

Приращения кривизн после упрочнения найдем по формулам (1), то есть

$$\Delta x_u = \frac{1}{EJ_v} \oint_s \int_0^a u (\sigma_t - \mu \sigma_s) d\xi ds, \quad \Delta x_v = -\frac{1}{EJ_u} \oint_s \int_0^a v (\sigma_t - \mu \sigma_s) d\xi ds. \quad (5)$$

Применяя (4), получим

$$\delta_1 = -2\pi R^2 (\Delta x_u \cos \alpha + \Delta x_v \sin \alpha), \quad \delta_2 = -2\pi R (\Delta x_u \cos \alpha + \Delta x_v \sin \alpha), \quad (6)$$

где  $\delta_1$  - линейное перемещение концов кольца в окружном направлении,  $\delta_2$  - угловое перемещение этих концов в плоскости оси кольца.

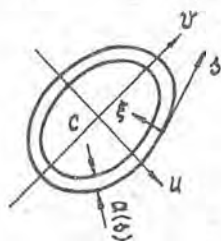
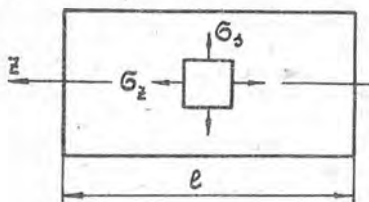


Рис. 1

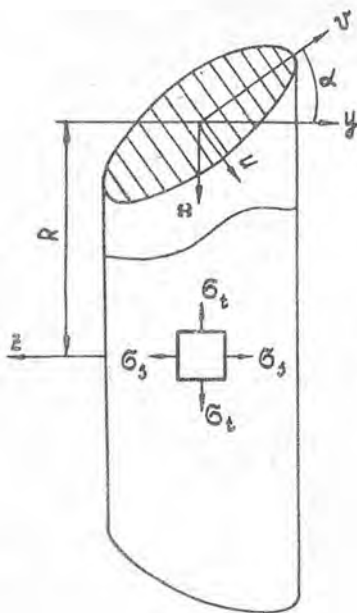


Рис. 2

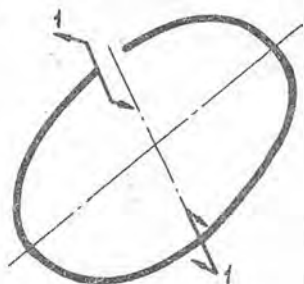


Рис. 3

Другие взаимные перемещения отсутствуют, но поперечные сечения кольца поворачиваются в своих плоскостях на одинаковый угол  $\psi_1$ . Используя формулу (4) и единичное нагружение, показанное на рис. 3, найдем

$$\psi_1 = -R (\Delta x_u \sin \alpha - \Delta x_v \cos \alpha). \quad (7)$$

В силу самоуравновешенности и осевой симметрии остаточных усилий, нагрузками, устраняющими  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , могут быть лишь пары сил  $M_y$  в плоскости оси кольца. Учитывая, что эти пары сил должны вызвать перемещения  $-\delta_1$ ,  $-\delta_2$ , получим

$$M_y = -E \frac{\Delta x_u \cos \alpha + \Delta x_v \sin \alpha}{\frac{\cos^2 \alpha}{J_v} + \frac{\sin^2 \alpha}{J_u}} \quad (8)$$

Пары сил  $M_y$  вызывают также поворот поперечных сечений кольца в своих плоскостях на угол  $\psi_2$ , который найдем по формуле

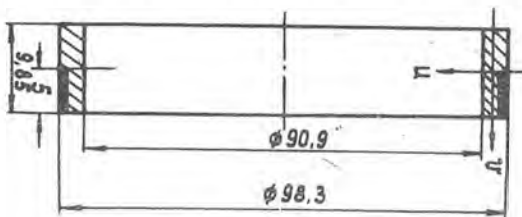


Рис. 4

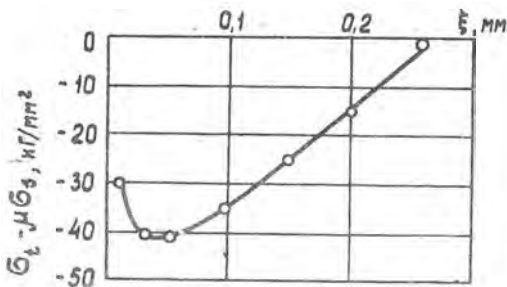


Рис. 5

(4), используя единичное нагружение, изображенное на рис.3:

$$\psi_2 = - \frac{\mu_y R}{2E} \left( \frac{1}{J_v} - \frac{1}{J_u} \right) \sin 2\alpha. \quad (9)$$

Сложив  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , приходим к выражению для угла поворота сечения кольца в своей плоскости после упрочнения:

$$\psi = -R \left[ \left( \sin \alpha + \frac{J_{xy}}{J_x} \cos \alpha \right) \Delta \varepsilon_u - \left( \cos \alpha - \frac{J_{xy}}{J_x} \sin \alpha \right) \Delta \varepsilon_v \right]. \quad (10)$$

По формулам (3), (10) определяется искажение формы кольцевой детали после ППД. Необходимые при этом остаточные напряжения в тонком поверхностном слое, претерпевшем при обработке пластические деформации, можно найти с помощью стандартных образцов-свидетелей. Если до упрочнения в детали были существенные остаточные напряжения, то их нужно учесть путем вычитания из возникающих после ППД.

В качестве примера рассматривалось кольцо из ст.45 (рис.4), подвергнутое отжигу для снятия остаточных напряжений. Часть наружной поверхности на длине 5мм подвергалась равномерной дробеструйной обработке, после которой произошли следующие перемещения:  $\Delta D = 5 \cdot 10^{-3}$  мм,  $\psi = 6,1 \cdot 10^{-4}$  радиан.

В расчетах по формулам (3), (10) использовалась эпюра остаточных напряжений, полученная с помощью образцов-свидетелей (рис.5). Получены следующие значения перемещений:  $\Delta D = 4,6 \cdot 10^{-3}$  мм,  $\psi = 6,85 \cdot 10^{-4}$  радиан.

Расхождение результатов расчета и данных опыта невелико; оно, по-видимому, в значительной мере связано с погрешностями измерения небольших перемещений.