

УДК 621.787

С.А.Букатый, С.И.Иванов

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ТОНКОСТЕННОГО ВАЛА
ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

В авиадвигателестроении получили широкое распространение различные виды отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием, которые наряду с повышением прочности и улучшением поверхности приводят к нежелательным изменениям формы и размеров детали. Эти явления связаны с изменением высоты микронеровностей и образованием остаточных напряжений, причем роль остаточных напряжений является преобладающей.

Для учета указанных явлений еще на стадии разработки технологии необходимо знать зависимости между изменением размеров и остаточными напряжениями. Для кольцевых деталей и деталей типа бруса такие зависимости получены в [1] и [2]. В настоящей

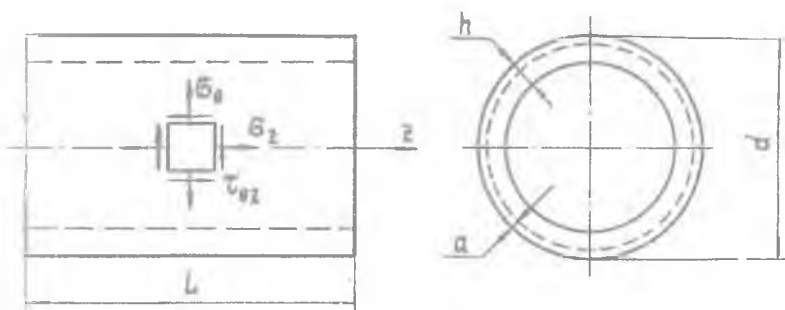


Рис. 1

статье рассматривается еще одна широко распространенная деталь - тонкостенный вал. В его поверхностном слое малой толщины a наведены, например, поверхностным пластическим деформированием остаточные напряжения $\sigma_{\theta}(\tau)$, $\sigma_z(\tau)$, $\tau_{\theta z}(\tau)$ (рис. 1).

Для определения удлинения вала ΔL , угла закручивания φ и приращения диаметра средней части Δd , связанных с остаточными напряжениями, рассмотрим действие пластически деформированного слоя a на вал (рис. 2). Обусловленные остаточными напряжениями растягивающая сила, крутящий момент и давление равны

$$N = -\pi d \int_0^a \sigma_z(\xi) d\xi, \quad M = -\frac{\pi d^2}{2} \int_0^a \tau_{\theta z}(\xi) d\xi, \quad q = \frac{2}{d} \int_0^a \sigma_{\theta}(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где ξ - расстояние от поверхности до текущего слоя.

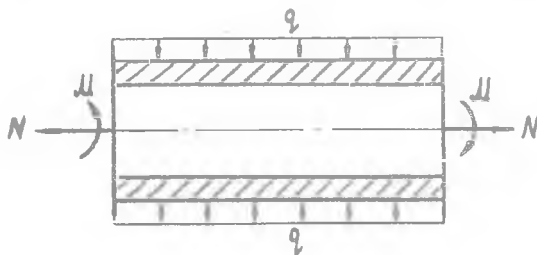


Рис. 2

Удлинение вала вызывается растягивающими силами N и давлением q на наружной поверхности:

$$\Delta L = \frac{NL}{EF} - \frac{\mu L d}{E 2h} q = -\frac{L}{Eh} \int_0^a [\sigma_z(\xi) - \mu \sigma_{\theta}(\xi)] d\xi. \quad (2)$$

Угол закручивания обусловлен остаточными касательными напряжениями, то есть парами сил M :

$$\varphi = \frac{M L}{G J_p} = -\frac{2 L}{G d h} \int_0^a \tau_{\theta z}(\xi) d\xi. \quad (3)$$

Изменение диаметра вызывается силами N и давлением q :

$$\Delta d = -\mu \frac{N d}{EF} - \frac{q d^2}{2 E h} = -\frac{d}{E h} \int_0^a [\sigma_{\theta}(\xi) - \mu \sigma_z(\xi)] d\xi. \quad (4)$$

Такое изменение диаметра будет наблюдаться по всей длине вала, если на его торцах приложены напряжения $\sigma_z(z)$, равные напряжениям во внутренних сечениях вала. Фактически, торцы свободны от нагрузок; и поэтому к Δd , вычисленному по формуле (4), нужно добавить удвоенное радиальное перемещение, вызванное нагружением цилиндра на торцах напряжениями - $\sigma_z(z)$ (рис. 3а).

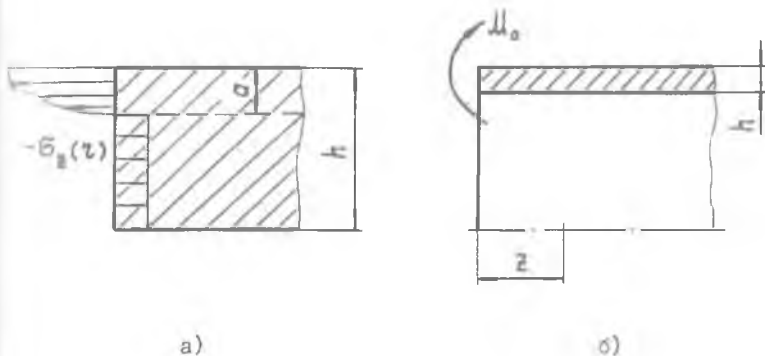


Рис. 3

После приведения этих нагрузок к средней линии сечения вала получим нагружение на торце распределенным моментом (рис. 3б):

$$M_0 = \int_{\frac{d}{2}-h}^{\frac{d}{2}} \left(z - \frac{d-h}{2} \right) \sigma_z(z) dz \approx \frac{h}{2} \int_0^a \sigma_z(\xi) d\xi \quad (5)$$

Соответствующие этому нагружению радиальные перемещения определяются по следующей формуле [3]:

$$w = \frac{M_0}{2k^2 D} e^{-kz} (\cos kz - \mu \sin kz), \quad (6)$$

где
$$k^2 = \frac{\sqrt{12(1-\mu^2)}}{dh}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

Следовательно, полное изменение диаметра вала должно быть представлено так:

$$\Delta d_n = \Delta d + 2w = -\frac{d}{Eh} \int_0^a [\sigma_\theta(\xi) - \mu \sigma_z(\xi)] d\xi + \frac{h}{2k^2 D} e^{-kz} (\cos kz - \mu \sin kz) \int_0^a \sigma_z(\xi) d\xi \quad (7)$$

Выше рассматривалось изменение размеров вала после обработки наружной поверхности. Если обрабатывается внутренняя поверхность, то формулы (2)-(4) остаются прежними, а (7) меняет знак перед вторым слагаемым. Изменение размеров вала после обработки и наружной и внутренней поверхности определяется суммированием перемещений, вычисленных для каждого случая.

Следует помнить, что полученные результаты справедливы при $L \geq 1,65\sqrt{dh}$. Это соотношение выполняется не только для толстых валов, но и для сравнительно коротких втулок.

Необходимые для расчетов остаточные напряжения в слое a претерпевшем пластическую деформацию при обработке поверхности детали, можно определить на образцах-свидетелях. Если до обработки детали в ней были остаточные напряжения, то напряжения, участвующие в расчетных формулах, нужно на соответствующую величину уменьшить.

С целью иллюстрации результатов настоящего исследования определялось изменение диаметра цилиндра из стали ШИ-96Г с размерами $L = 106$ мм, $d = 147$ мм, $h = 4$ мм, подвергнутого пневмодробеструйному упрочнению по наружной поверхности.

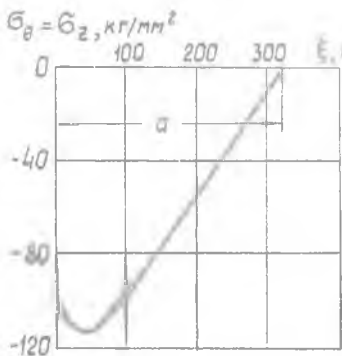


Рис. 4

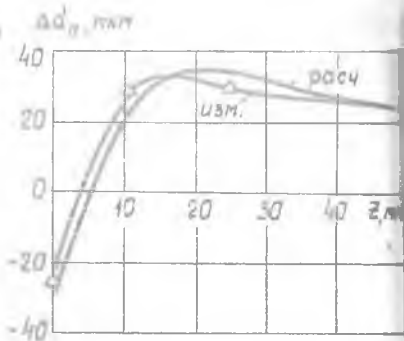


Рис. 5

Остаточные напряжения, полученные на образцах-свидетелях, показаны на рис. 4. До упрочнения остаточные напряжения в цилиндре практически отсутствовали. Результаты измерений и расчетов по формуле (7), приведенные на рис. 5, достаточно хорошо совпадают.

Изложенный в статье подход можно применить и в случае, когда упрочняется любая часть поверхности вала. При этом используются известные решения теории осесимметричного сопротивления цилиндрических оболочек.

Л и т е р а т у р а

1. С.И.Иванов, С.А.Букатый. Искажение формы кольцевой детали после упрочнения поверхностным пластическим деформированием. В сб. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций". Ивановский сборник, вып. 2, Куйбышев, 1975.
2. С.И.Иванов, С.А.Букатый. Об искажении формы детали титанового бруса после обработки ППД. ИВУЗ, "Авиационная техника", № 3, 1976.
3. Справочник машиностроителя, том 3. Машгиз, М., 1962.