

УДК 621.787

С. А. Букатый

ДЕФОРМАЦИИ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН
ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Изменения размеров и формы лопаток турбомашин после поверхностной обработки рассматривались в ряде работ [1, 2, 3, 4]. В этих работах деформации лопаток связываются в основном с осевыми остаточными напряжениями, образующимися в результате обработки.

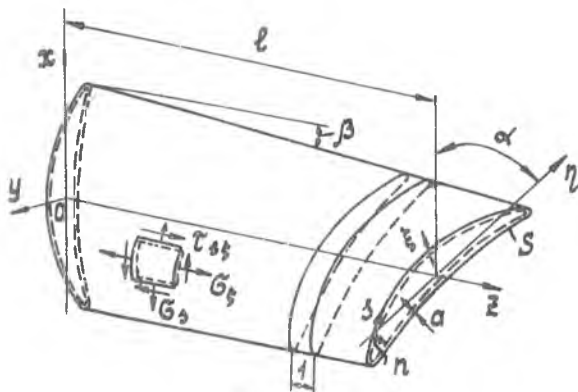


Рис. I

Однако расчеты по известным методикам даже применительно к слабо закрученным лопаткам, для которых обычно влиянием закрутки пренебрегают, плохо согласуются с экспериментальными данными. Особенно велико расхождение теории с опытом при определении изменения углов закрутки. В то же время необходима надежная методика расчета деформаций, которая позволит подбирать соответствующим образом

режимы обработки и добиваться уменьшения деформаций лопаток. Решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

Будем рассматривать естественно закрученный брус постоянного сечения, образованный винтовым движением поперечного сечения вдоль оси z против хода часовой стрелки. Для брусьев с умеренными углами закрутки можно считать, что ось z , проходящая через центры тяжести поперечных сечений, совпадает с линией центров жесткости сечений. Отнесем консольно закрепленный брус к неподвижной системе координат $XUYZ$ так, чтобы оси X, Y совпали с главными центральными осями корневого сечения (рис. 1). Введем также связанную с текущим сечением систему координат $\eta\xi z$, в которой η и ξ являются главными центральными осями поперечного сечения, и примем следующие обозначения:

$\alpha(z)$ - угол естественной закрутки бруса; $\theta(z) = \frac{d\alpha}{dz}$ - относительный угол естественной закрутки бруса; $\varphi(z)$ - уменьшение угла естественной закрутки, вызванное остаточными напряжениями; ε_0 - относительное удлинение оси бруса; χ_ξ, χ_η - составляющие кривизны оси бруса; u, v, w - линейные перемещения точек оси бруса в направлении осей X, Y, Z ; S, ω - контур и секториальная координата контура поперечного сечения бруса; $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ - расстояние от рассматриваемой точки сечения до оси z ; T, F - длина средней линии и площадь поперечного сечения бруса; $J_\xi = \int \eta^2 dF$, $J_\eta = \int \xi^2 dF$ - главные центральные моменты инерции поперечного сечения бруса; $J_K = \frac{1}{3} \int h^3(\tau) d\tau$ - геометрическая жесткость поперечного сечения бруса на кручение (рис. 2); $J_p = \int r^2 dF$ - полярный момент инерции; $J_{p\xi} = \int \xi^2 \eta dF$, $J_{p\eta} = \int \eta^2 \xi dF$ - полярно-осевые моменты инерции; $J_{4p} = \int r^4 dF$ - полярный момент инерции четвертого порядка.

Воспользуемся решением И.А.Биргера [5], согласно которому деформация бруса в осевом направлении при сложном сопротивлении определяется выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \chi_\eta - \chi_\xi \xi - \theta z^2 \frac{d\varphi}{dz}. \quad (I)$$

Наряду с поперечным сечением бруса будем рассматривать ортого-

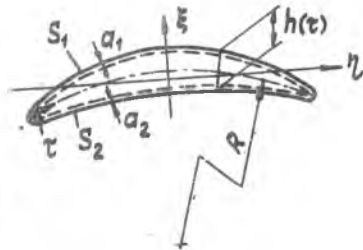


Рис. 2

нальное сечение [5], представляющее собой поверхность, перпендикулярную ко всем винтовым линиям ξ . Угол наклона линии ξ к оси z

$$\beta(z, z) = \arctg(\theta z). \quad (2)$$

Для брусьев с малыми и умеренными углами закрутки ($\beta^2 \ll 1$)

$$\beta \approx \theta z, \quad \sin \beta \approx \beta, \quad \cos \beta \approx 1. \quad (3)$$

В силу равенств (3) можно считать, что геометрические характеристики поперечного и ортогонального сечений, проходящих через одну точку оси бруса, совпадают. Остаточные напряжения, образовавшиеся в результате обработки в поверхностном слое a бруса, обозначим: $\sigma_z(n, s, \xi)$, $\sigma_s(n, s, \xi)$, $\tau_{sz}(n, s, \xi)$ (рис. 1).

Для определения деформаций бруса, вызванных остаточными напряжениями, воспользуемся известными соотношениями:

$$\frac{dw}{dz} = \epsilon_0, \quad (4)$$

$$\frac{d^2u}{dz^2} = \chi_x = \chi_z \cos \alpha + \chi_\xi \sin \alpha, \quad (5)$$

$$\frac{d^2v}{dz^2} = \chi_y = -\chi_z \sin \alpha + \chi_\xi \cos \alpha, \quad (6)$$

где ϵ_0 , χ_ξ и χ_z определяются следующими выражениями [5]:

$$\epsilon_0 = \frac{N_z}{EF} + \frac{d\varphi}{dz} \frac{\theta J_p}{F}, \quad (7)$$

$$\chi_z = \frac{M_z}{EJ_z} - \frac{d\varphi}{dz} \frac{\theta J_{pz}}{J_z}, \quad (8)$$

$$\chi_\xi = -\frac{M_\xi}{EJ_\xi} - \frac{d\varphi}{dz} \frac{\theta J_{p\xi}}{J_\xi}. \quad (9)$$

Для N_z , M_z и M_ξ на основании работы [6] можно записать:

$$\begin{aligned} N_z &= -\oint_s \int_0^a (\sigma_z - \mu \sigma_s) dn ds, \\ M_z &= -\oint_s \xi \int_0^a (\sigma_z - \mu \sigma_s) dn ds, \\ M_\xi &= \oint_s \eta \int_0^a (\sigma_z - \mu \sigma_s) dn ds. \end{aligned} \quad (10)$$

Найдем изменение угла закрутки бруса. Для этого обратимся к ортогональному сечению, существенной особенностью которого является наличие крутящего момента относительно оси бруса в результате действия нормальных напряжений. Следовательно, от остаточных напряжений σ_ξ и σ_η в слое a появляется крутящий момент

$$M_{K1} = \int_{F_a} (\sigma_\xi - \mu \sigma_\eta) r \sin \beta dF \approx \oint_S \theta r^2 \int_0^a (\sigma_\xi - \mu \sigma_\eta) dn ds. \quad (11)$$

Необходимо учесть также крутящий момент, обусловленный остаточными касательными напряжениями в том же слое [6]:

$$M_{K2} = - \oint_S \int_0^a \tau_{\xi\eta} dn d\omega. \quad (12)$$

Условие равновесия всех крутящих моментов в произвольном сечении бруса будет следующим:

$$M_K^T - M_K - \int_{F-F_a} \sigma \theta r^2 dF = 0, \quad (13)$$

где M_K^T - крутящий момент касательных напряжений в сечении без слоя a , вызывающий изменение угла закрутки бруса;

$$M_K = M_{K1} + M_{K2}; \quad (14)$$

σ - нормальные напряжения в поперечном сечении бруса без слоя a :

$$\sigma = E \varepsilon = E (\varepsilon_0 - \chi_\eta \eta - \chi_\xi \xi - \theta r^2 \frac{d\varphi}{dz}) \quad (15)$$

Подставив (15) в (13) и учитывая соотношение

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{M_K^T}{GJ_K}, \quad (16)$$

на основании выражений (7) + (9) получим

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{\theta}{(1+q_1-q_2)GJ_K} \left(N_z \frac{J_p}{F} + M_K \frac{1}{\theta} + M_{\eta} \frac{J_{p\eta}}{J_\eta} - M_\xi \frac{J_{p\xi}}{J_\xi} \right), \quad (17)$$

где

$$q_1 = \frac{E\theta^2}{GJ_K} \left(J_{\eta p} - \frac{J_{p\eta}^2}{J_\eta} - \frac{J_{\xi p}^2}{J_\xi} \right),$$

$$q_2 = \frac{E\theta^2}{GJ_K} \frac{J_p^2}{F}. \quad (18)$$

Заметим, что в работе [4] не был учтен M_K , роль которого существенна даже для слабо закрученных брусьев.

Принтегрировав уравнения (4) + (6) и (17), с учетом гра-

ничных условий

$$\text{(при } z = 0 \quad u = v = w = \frac{du}{dz} = \frac{dv}{dz} = \varphi = 0 \text{)} \quad (19)$$

получим

$$\Delta l = w(l) = \int_0^l \frac{N_z}{EF} dz + \int_0^l \frac{d\varphi}{dz} \frac{\theta J_p}{F} dz, \quad (20)$$

$$f_x = u(l) = \int_0^l (\chi_\eta \cos \alpha + \chi_\xi \sin \alpha)(l-z) dz, \quad (21)$$

$$f_y = v(l) = \int_0^l (-\chi_\eta \sin \alpha + \chi_\xi \cos \alpha)(l-z) dz, \quad (22)$$

$$\varphi(l) = \int_0^l \frac{\theta}{(1+q_1 - q_2)GJ_k} (N_z \frac{J_p}{F} + M_k \frac{1}{\theta} + M_\eta \frac{J_{p\eta}}{J_\eta} - M_\xi \frac{J_{p\xi}}{J_\xi}) dz. \quad (23)$$

Для лопаток с удлиненным профилем ($J_\eta \ll J_\xi$) изгибом в плоскости наибольшей жесткости можно пренебречь.

Из выражений (21), (23) следует и подтверждается экспериментом, что при равномерном упрочнении поверхностным пластическим деформированием, например гидродробеструйным способом, происходит изгиб лопатки в сторону выпуклой поверхности. Для устранения изгиба эта сторона должна упрочняться с большей интенсивностью, т.е. остаточные напряжения должны быть больше по величине или иметь большую глубину залегания. Однако в таком случае появляются дополнительные деформации, связанные с изменением кривизны профиля поперечного сечения лопатки. Расчеты показали, что величины дополнительных прогибов малы по сравнению с f_x , f_y и ими можно пренебречь. Однако дополнительные изменения ψ углов закрутки часто превышают технологические допуски и в несколько раз больше величин, найденных по формуле (23). Для определения ψ воспользуемся подходом, приведенным в работе [7].

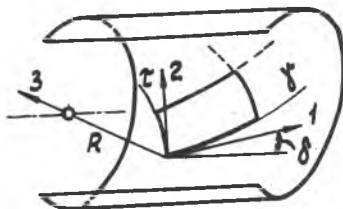


Рис. 3

На поверхности цилиндра радиуса R (рис. 3) проведем две системы взаимно ортогональных винтовых линий γ и τ так, чтобы угол δ между касательной к линии $\tau = \cos t$ и осью цилиндра удовлетворял условию $\delta^2 \ll 1$. При этом условии имеем следующие компоненты кривизны и кручение

поверхности вдоль линий γ , τ :

$$K_1 = \frac{\delta^2}{R}, \quad K_2 = \frac{1}{R}, \quad K_{12} = \frac{\delta}{R}. \quad (24)$$

Переходя к закрученному тонкостенному брусу, примем, что координата γ отсчитывается по срединной поверхности бруса в направлении его оси z , а координата τ — вдоль средней линии поперечного сечения. Тогда на основании (24) имеем

$$\theta \approx K_{12} = \frac{\delta}{R}, \quad (25)$$

где R — осредненный радиус кривизны средней линии поперечного сечения бруса.

Следовательно, изменение кривизны профиля поперечного сечения при неизменном δ влечет за собой изменение закрутки бруса ψ . Таким образом, на основании (25) получим

$$\frac{d\psi}{dz} = \delta \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right), \quad (26)$$

где R' — осредненный радиус кривизны средней линии поперечного сечения бруса после образования остаточных напряжений.

Для определения величины $\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right)$ выделим из бруса двумя параллельными плоскостями, перпендикулярными оси бруса, полоску единичной ширины (рис. I). Рассматривая полоску как слабо изогнутый брус с осредненными параметрами, получим

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \approx \frac{M_z}{EJ_z}, \quad (27)$$

где осредненные величины определяются:

$$\frac{M_z}{EJ_z} \approx \frac{1}{ET} \int_0^l \frac{M_z(\tau)}{J_z(\tau)} d\tau, \quad (28)$$

$$M_z(\tau) = -\frac{1 \cdot h(\tau)}{2} \left[\int_0^{a_2} (\sigma_s - \mu \sigma_s) dn - \int_0^{a_1} (\sigma_s - \mu \sigma_s) dn \right], \quad (29)$$

$$J_z(\tau) = \frac{1 \cdot h^3(\tau)}{12}.$$

Подставив (27) в (26) и проинтегрировав по длине бруса, получим

$$\psi(l) = \delta \int_0^l \frac{M_z}{EJ_z} dz. \quad (30)$$

Таким образом, полное изменение угла закрутки бруса будет

$$\varphi_{\text{полн.}} = \varphi(e) + \psi(e). \quad (31)$$

Изложенная теория хорошо подтверждается экспериментами, проведенными на лопатках второй ступени направляющего аппарата компрессора. Лопатки длиной 300 мм из ВТ-20 упрочнялись гидродробеструйным способом сначала с вогнутой стороны при давлении жидкости $P = 2,5 \text{ кгс/см}^2$, а затем с выпуклой при $P = 4,1 \text{ кгс/см}^2$, подобранном таким образом, чтобы остаточный прогиб отсутствовал. На каждом этапе измерялись изменения углов закрутки лопаток, которые затем сравнивались с расчетными значениями по изложенной и известной [4] теориям (см. табл. I).

Таблица I

Варианты упрочнения	Расчет по изложенной теории			Эксперим. значения $\varphi_{\text{эксп}}$, рад	Расчет по методике работы [4] φ , рад
	φ , рад	ψ , рад	$\varphi + \psi$, рад		
С вогнутой стороны $P = 2,5 \text{ кгс/см}^2$	-0,00288	-0,00488	-0,00776	-0,00763	-0,00633
С выпуклой стороны $P = 4,1 \text{ кгс/см}^2$	+0,00462	+0,01017	+0,01479	+0,01488	-0,00066
С выпуклой стороны $P = 4,1 \text{ кгс/см}^2$ и вогнутой стороны $P = 2,5 \text{ кгс/см}^2$	+0,00175	+0,00529	+0,00704	+0,00725	-0,00699
С выпуклой и вогнутой стороны $P = 2,5 \text{ кгс/см}^2$	+0,00013	-	+0,00013	0+0,00015	-0,00676

При одновременном упрочнении обеих сторон на режиме $P = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ наблюдалось смещение f_y концевых сечений лопаток в сторону выпуклой стороны на величину $1,5 + 2,0 \text{ мм}$. Расчетные величины составили: по изложенной теории $1,4 + 1,7 \text{ мм}$, по работам [1, 2, 3] - $2,0 + 2,3 \text{ мм}$.

Предлагаемая теория использовалась для разработки методики определения оптимальных режимов упрочнения, обеспечивающих уменьшение коробления направляющих лопаток I + 3 ступеней компрессора авиационного двигателя.

Л и т е р а т у р а

1. Купершток С.Н., Петров В.П. Расчет остаточных деформаций турбинных лопаток. "Энергомашиностроение", № I, 1968 г.

2. Исаев А.И., Овсенко А.Н. Определение остаточных напряжений и деформаций компрессорных и турбинных лопаток. "Энергомашиностроение", № 8, 1968.

3. Овсенко А.Н. Расчет остаточных деформаций турбинных и компрессорных лопаток переменного сечения с закруткой. "Энергомашиностроение", № 2, 1973.

4. Купершток С.Н., Петров В.П. Изменение закрутки турбинных лопаток под действием остаточных напряжений. "Энергомашиностроение", № I2, 1969.

5. Биргер И.А. Руководство для конструкторов по расчету на прочность ГТД., вып. 2. Расчет лопаток на прочность. Оборонгиз, Москва, 1956.

6. Иванов С.И., Букацкий С.А. Об искажении формы детали типа бруса после обработки ИИД. ИВУЗ "Авиационная техника", №3, 1976.

7. Шорр Б.Ф. К теории закрученных тонкостенных стержней. Изв. АН СССР, ОН, "Механика и машиностроение", № 5, 1960.