

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ НАДЁЖНОСТИ И УВЕЛИЧЕНИЮ РЕСУРСА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Букатый С.А., Букатый А.С.

Самарский университет, г. Самара, bukaty\_sa@mail.ru

*Ключевые слова:* поверхностное упрочнение, остаточные напряжения, технологические остаточные деформации, автоматизированный прибор АСБ-1.

Для повышения надёжности и долговечности ответственных деталей ГТД широко используется поверхностное упрочнение, в результате которого в тонком поверхностном слое деталей образуются сжимающие остаточные напряжения (ОН). Однако, наряду с повышением сопротивления усталости, возникающие в процессе упрочняющей обработки ОН приводят к нежелательным, а в ряде случаев к недопустимым изменениям размеров и формы – технологическим остаточным деформациям деталей. Для решения этой проблемы необходимо контролировать величину ОН и выбирать режимы упрочнения по допускаемым деформациям. Использование для определения ОН образцов-свидетелей в таких случаях не обеспечивает необходимой достоверности, которую могут обеспечить образцы, вырезаемые непосредственно из деталей. Поскольку такие образцы получаются существенно отличающимися от стандартных с прямоугольным сечением, нами разработаны методики, основанные на [1, 2], позволяющие определять напряжения в стержневых образцах с произвольным и переменным по длине образца поперечным сечением и закруткой:

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{E}{3 \cdot l^2} \left\{ 12H(\xi)f_0 + H(\xi)^2 \cdot \frac{df}{d\xi} - 4H(\xi)f(\xi) + 2 \int_0^{\xi} f(\xi) d\xi \right\}, \quad (1)$$

где  $H(\xi)$  – функция, зависящая от формы поперечного сечения образца.

Для ответственных кольцевых деталей, таких как кольца подшипников, необходим контроль ОН на каждом этапе их изготовления. Поскольку условия реализации режимов обработки на плоской и криволинейной поверхностях беговых дорожек различные, это приводит к значительному различию определяемых ОН в образцах-свидетелях и реальных кольцах. Поэтому на основе теории остаточных деформаций колец с произвольным поперечным сечением разработана методика и получено общее выражение для определения ОН непосредственно в кольцах подшипников. Для колец большого диаметра удобнее определять ОН на криволинейных элементах, вырезанных из колец или цилиндрических деталей. Для колец с малой и большой кривизной, у которых  $R/h > 5$  и  $R/h < 5$  ( $R$  – радиус оси кольца,  $h$  – наибольший размер поперечного сечения кольца в радиальном направлении), обладающих прямоугольным или произвольным поперечным сечением используются формулы, полученные на основе работ [1, 2]:

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{E}{3D^2(\xi)} \left\{ \frac{4D^2(\xi)}{D_{\text{ср}}^2} (h - 2\xi)\delta_p - (h - \xi)^2 \cdot \frac{d\delta}{d\xi} + 2D^2(\xi) \int_0^{\xi} \frac{2h - 3a + \xi}{D^2(\xi)} \cdot \frac{d\delta}{d\xi} d\xi \right\}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{E}{2} \left\{ \frac{(y_{0\xi} + e_0)}{\rho_0(y_{0\xi} + r_0)} \delta_p + 2 \left( \frac{r_\xi}{\rho_\xi} - 1 \right) \cdot \frac{d\delta}{d\xi} - \int_0^{\xi} \frac{1}{\rho_\xi} \left( \frac{y_{0\xi} + e_\xi}{y_{0\xi} + r_\xi} + \frac{e_\xi}{y_{0\xi}} \right) \cdot \frac{d\delta}{d\xi} d\xi \right\}. \quad (3)$$

Аналогичные выражения получены для определения ОН в гальванических покрытиях деталей. Все изложенные методики реализованы в Автоматизированной системе (АС) на базе прибора АСБ-1. Модульный принцип конструкции прибора позволяет определять ОН в образцах различных типов. В состав АС входят компьютер с системой защиты данных от потерь, источник бесперебойного питания, лазерный принтер, блок стабилизированного питания для обеспечения работы прибора АСБ-1. Результаты расчёта ОН выводятся на экран и на принтер в табличной и графической форме.

Достоверное определение ОН позволяет оценивать возможные технологические остаточные деформации (ТОД) и соответственно назначать режимы упрочнения, обеспечивающие необходимые сопротивление усталости и геометрическую точность деталей. На основе энергетического подхода [3] разработан метод определения эффективных режимов упрочнения. В качестве примера приводится выбор рациональных режимов упрочнения микрошариками маложёстких деталей по допускаемым деформациям. Давление  $p$  воздуха или жидкости является основным управляемым параметром режима упрочнения, который подбирают из условия формирования величины и глубины залегания ОН и обеспечения максимального или необходимого предела выносливости детали. Для этого необходимо иметь зависимость предела выносливости  $\sigma_{-1}$  от удельной энергии поверхностного слоя  $U_0$  и, в свою

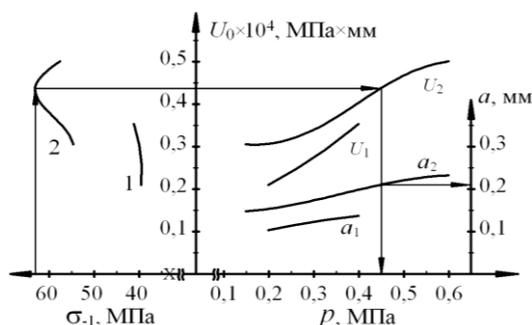


Рисунок 1 – Номограмма для определения давления  $p$  рабочего энергоносителя

1,  $U_1$ ,  $a_1$  – зависимости  $\sigma_{-1}$ ,  $U_0$  и  $a$  для стеклянных микрошариков; 2,  $U_2$ ,  $a_2$  – зависимости  $\sigma_{-1}$ ,  $U_0$  и  $a$  для стальных микрошариков

очередь, зависимости  $U_0$  и толщины слоя  $a$  от давления  $p$ . Эти зависимости для каждого материала определяют экспериментально. Полученные зависимости для удобства пользования представлены на рис. 1 в виде номограммы [3], построенной на основе результатов исследования предела выносливости и ОН на образцах из стали ЭП-666, упрочнённых дробеструйным способом стальными микрошариками диаметром 0,3 мм при давлениях 0,15–0,6 МПа. Схема пользования номограммой показана стрелками.

#### Список литературы

1. Букатый С.А. Прогнозирование коробления деталей ГТД после обработки поверхности на основе исследования остаточного напряжённого состояния материала: дис. докт. техн. наук: 05.07.05, 01.02.06. Рыбинская гос. авиац. технол. академия, Рыбинск, 1996 265 с.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
3. Букатый С.А., Букатый А.С. Энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием / Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 10(67). С. 45-49.

#### Сведения об авторах

Букатый С.А., д.т.н., профессор, профессор Самарского университета. Область научных интересов: механика разрушения и малоцикловая усталость, остаточные напряжения и деформации.

Букатый А.С., д.т.н., профессор Самарского университета. Область научных интересов: упрочняющие технологии и покрытия, остаточные напряжения и деформации.

### THE COMPLEX APPROACH FOR IMPROVING THE RELIABILITY AND INCREASING THE LIFE OF CRITICAL PARTS OF THE GAS TURBINE ENGINE BASED ON TECHNOLOGICAL METHODS

Bukatyi S.A., Bukatyi A.S.

Samara University, Samara, Russia, bukaty\_sa@mail.ru

*Keywords: surface hardening, residual stresses, technological residual deformation, automated system ASB-1.*

This paper contains the description of methods of residual stress determination in samples of complex shapes, cutted from the experimental parts, bearing rings and parts with galvanic coating. The automated system ASB-1, which implements these methods is presented here. Shown an example of a method for determining the regimes of shot peen hardening providing the permissible deformation.