

УДК 621.9.62:621.81–192

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ И МАЛОЖЁСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД НА ОСНОВЕ ДОПУСКАЕМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

© 2009 С. А. Букатый¹, А. С. Букатый²

¹Рыбинская государственная авиационная технологическая академия

²Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

На основе анализа остаточного напряжённого состояния детали и использования понятия начальных напряжений разработан энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения, обеспечивающий повышение сопротивления усталости и геометрической точности детали в пределах технологического допуска. Показана реализация метода на примере упрочнения микрошариками.

Поверхностное упрочнение, остаточные напряжения, технологические остаточные деформации, энергия поверхностного слоя, допускаемые деформации, номограмма

В настоящее время широко используется упрочнение деталей машин поверхностным пластическим деформированием (ППД). Однако, наряду с улучшением поверхности и повышением сопротивления усталости, возникающие после ППД остаточные напряжения (ОН) приводят к нежелательным, а в ряде случаев к недопустимым изменениям размеров и формы – технологическим остаточным деформациям (ТОД) деталей. Проблема обеспечения геометрической точности особенно важна в энергетическом и авиационном машиностроении, где преобладают тонкостенные и маложёсткие детали.

В основе решения задачи назначения рациональных режимов упрочнения лежит создание в поверхностном слое детали такого распределения ОН, при котором деталь будет обладать необходимым или максимально-возможным пределом выносливости при условии, что технологические остаточные деформации (ТОД) не превысят технологические допуски. Для решения данной задачи необходимо:

- установить связь предела выносливости материала с основными параметрами режимов упрочнения и величиной ОН, образующихся при упрочнении;
- разработать рабочие методики прогнозирования ТОД и анализа связи ТОД с величиной и расположением зон упрочнения.

Указанные расчетные методики могут быть разработаны на основе аналитических [1] и конечно-элементных – численных методов [2]. В данной работе рассмотрены оба

подхода к прогнозированию ТОД.

Для реализации указанных этапов необходимо предварительное проведение экспериментальных исследований связи параметров режима упрочнения λ_i с величиной и глубиной залегания ОН и пределом выносливости, которые определяют на образцах или опытных деталях. Для широко используемого в настоящее время дробеструйного способа упрочнения микрошариками к таким основным параметрам относятся: давление энергоносителя (воздуха или жидкости) p , диаметр шариков $d_{ш}$, время упрочнения τ , концентрация микрошариков $K_{ш}$, скорость движения сопла V_c , расстояние от сопла до упрочняемой поверхности h , скорость вращения рабочего стола ω_c . Обычно управляемым параметром является давление воздуха или рабочей жидкости p . Остальные параметры регламентированы исходя из конструкции установок, либо являются взаимозависимыми и обусловлены размерами и геометрией упрочняемых деталей.

Из закона сохранения энергии следует, что энергия упругой деформации деталей U_d (т.е. энергия ТОД) связана с энергией U_a поверхностного слоя a , пластически деформированного в процессе упрочняющей обработки. Следовательно

$$U_d = \Delta U_a = f(U_a).$$

Очевидно, что энергия U_a обусловлена необратимыми изменениями линейных размеров в материале (пластические деформации, структурно-фазовые превращения и др.), называемыми первоначальными деформациями (ПД) [3]. Однако, в силу отсутствия

достаточно точных методов определения ПД, на практике для определения U_a удобнее пользоваться понятием условных начальных напряжений [4]. При этом, как показано в работе [1], для расчета ТОД можно использовать размеры детали без уменьшения их на величину слоя a . Такой подход становится особенно удобным и эффективным при расчёте ТОД методом КЭ с применением специализированных пакетов ANSYS, КОСМОС и др.

В настоящее время известны два способа определения НН на основе ОН: путем численного решения интегрального уравнения [5] и методом последовательных приближений [1]. На наш взгляд предпочтительнее метод последовательных приближений, позволяющий использовать ОН, получаемые из эксперимента. Расчеты показывают, что количество необходимых приближений существенно зависит от отношения a/h . Если величина $a/h < 0,05$, то с точностью до 3 – 5 % различие между ОН и НН можно пренебречь. В таких случаях для расчета ТОД можно использовать ОН.

Обычно ОН определяют методом полойной стравливания поверхностного слоя на образцах прямоугольной формы (рис. 1). Толщину образцов h выбирают близкой к толщине упрочняемых деталей h_d , если величина $a/h_d \leq 0,1$, но не менее 2,5 – 3мм.

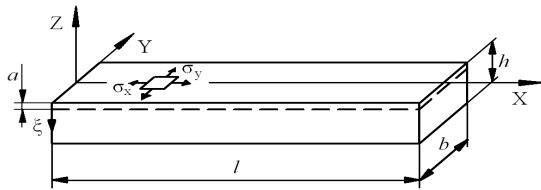


Рис. 1. Ориентация системы координат и направления остаточных напряжений

Принято считать, что дробеударные способы упрочнения создают в направлениях X и Y одинаковое пластическое деформирование поверхностного слоя и, следовательно, $\sigma_x = \sigma_y$. Поскольку метод удаления поверхностных слоёв позволяет определять только совокупность ОН $\sigma_{ост} = (\sigma_x - \mu\sigma_y)$, то можно принять

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\sigma_{ост}}{1 - \mu}, \quad \sigma_z = \sigma_\xi = 0.$$

и, соответственно, для НН

$$\sigma_{nx} = \sigma_{ny} = \frac{\sigma_n}{1 - \mu}, \quad \sigma_{nz} = \sigma_{n\xi} = 0. \quad (1)$$

Здесь μ – коэффициент Пуассона материала.

В общем случае выражение для удельной энергии деформированного поверхностного слоя имеет вид

$$u_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные НН.

Учитывая, что при ППД возникают сжимающие ОН и НН, то в рамках условия (1) можно принять

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\sigma_n}{1 - \mu}.$$

Тогда на основании (2) получаем следующее выражение для удельной энергии деформированного поверхностного слоя

$$u_0 = \frac{\sigma_n^2}{(1 - \mu) \cdot E}. \quad (3)$$

В тех случаях, когда ОН $\sigma_x \neq \sigma_y$ и упорочняемая поверхность детали обладает существенной кривизной, то следует анализировать соответствующее начальное напряженное состояние в слое a и определять главные напряжения. При этом в большинстве практических случаев напряжениями $\sigma_{n\xi}$ можно пренебречь, т.к. их величина имеет порядок $\sigma_n \cdot a/R$, где R – радиус кривизны поверхности.

Введём понятие удельной энергии поверхностного слоя a :

$$U_0 = \int_0^a u_0 d\xi = \frac{1}{(1 - \mu)E} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi. \quad (4)$$

Тогда параметры режимов упрочнения λ_i будем связывать с величиной и глубиной залегания НН через U_0 , от которой зависят ТОД. В этом случае становится возможным пренебречь характером распределения НН по толщине слоя a . Это существенно упрощает расчеты ТОД, т.к. фактическое распределение НН можно заменить некоторыми постоянными по толщине слоя a эквивалентными напряжениями $\sigma_3 = const$, величину которых найдем из соотношений

$$U_0 = \frac{1}{(1 - \mu) \cdot E} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi = \frac{1}{(1 - \mu) \cdot E} \int_0^a \sigma_3^2 d\xi = \frac{\sigma_3^2 \cdot a}{(1 - \mu) \cdot E}.$$

Отсюда получаем

$$\sigma_{\varepsilon 1} = \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi}. \quad (5)$$

Выражение (5) удобно для расчёта ТОД стержневых и кольцевых деталей с недеформируемым поперечным сечением. В общем случае для деталей сложной формы требуются обе составляющие эквивалентных НН, которые обозначим $\sigma_{\varepsilon 2}$. Тогда в соответствии с (1) получим

$$\sigma_{\varepsilon 2} = \frac{1}{1-\mu} \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi}. \quad (6)$$

Таким образом, величина U_0 может служить универсальным критерием для перехода от режимов упрочнения к ТОД. Особенно удобным становится применение U_0 в задачах, где равномерная обработка упрочнением по всей поверхности детали вызывает недопустимые ТОД. В этом случае на эффективном режиме обрабатывают наиболее ответственные и опасные участки поверхности (например, наиболее нагруженные участки или зоны концентрации напряжений). В зависимости от возникающих при этом ТОД остальная поверхность, подлежащая упрочняющей обработке, обрабатывается на пониженном или повышенном (для исправления геометрии) относительно основного режимах. Решение принимают на основе предварительного расчётного анализа ТОД.

Рассмотрим задачу определения необходимых параметров вышеуказанных режимов на основе расчётной величины U_{0p} . Для этого введем понятия допускаемой деформации $[\Delta_j]$ и “единичной” деформации $\Delta_{1,j}$ – от “единичной” величины эквивалентных напряжений $\sigma_{\varepsilon 1}$:

$$\begin{aligned} [\Delta_j] &= \Delta_{j\text{пред}} - \Delta_{j\text{эфф}}, \\ \Delta_{1,j} &= f_j(\sigma_{\varepsilon 1}), \end{aligned} \quad (7)$$

где индекс j означает соответствующий вид деформации (например, прогиб или разворот сечений лопатки, изменение диаметра валов или колец и т.п.); $\Delta_{j\text{пред}}$ – соответствующая предельная деформация, обусловленная технологическими допусками; $\Delta_{j\text{эфф}}$ – деформация, возникающая после упрочнения ответственных участков детали на эффективном режиме, обеспечивающем требуемый предел выносливости детали; f_j – функциональная зависимость деформации $\Delta_{1,j}$ от эквивалент-

ных напряжений $\sigma_{\varepsilon 1}$.

Здесь для удобства анализа можно принять $\sigma_{\varepsilon 1} = 100$ или 1000 МПа, т.к. от 1 МПа ТОД очень малы.

Обозначим используемые при расчёте ТОД интегральные величины эквивалентных единичных $\sigma_{\varepsilon 1}^1$ и расчётных напряжений $\sigma_{\varepsilon p}$ соответственно $\Phi_{\varepsilon 1}$ и $\Phi_{\varepsilon p}$:

$$\Phi_{\varepsilon 1} = \int_0^a \sigma_{\varepsilon 1}^1 d\xi = \sigma_{\varepsilon 1}^1 a, \quad \Phi_{\varepsilon p} = \int_0^a \sigma_{\varepsilon p} d\xi = \sigma_{\varepsilon p} a. \quad (8)$$

Тогда на основании (5) можно записать

$$\Phi_{\varepsilon p} = \Phi_{\varepsilon 1} \cdot \frac{[\Delta_j]}{\Delta_{1,j}} \quad \text{или} \quad \sigma_{\varepsilon p} = \sigma_{\varepsilon 1}^1 \cdot \frac{[\Delta_j]}{\Delta_{1,j}}. \quad (9)$$

В соответствии с законом Гука деформации деталей Δ пропорциональны величине Φ_{ε} , а величина энергии U_0 пропорциональна Φ_{ε}^2 . Следовательно, искомую расчётную величину U_{0p} найдем из соотношения

$$U_{0p} = U_{0,1} \cdot \left(\frac{[\Delta_j]}{\Delta_{1,j}} \right)^2, \quad (10)$$

где

$$U_{0,1} = \frac{1-\mu}{E} \int_0^a (\sigma_{\varepsilon 1}^1)^2 d\xi = \frac{1-\mu}{E} (\sigma_{\varepsilon 1}^1)^2 a. \quad (11)$$

По найденной величине U_{0p} определяем соответствующую ей величину a и параметры режима упрочнения λ_i (в данном случае это будет давление p). Необходимо отметить, что расчет деформаций $\Delta_{1,j}$ начинают при толщине слоя a , соответствующей основному – эффективному режиму упрочнения. Если полученная величина a , соответствующая расчётной U_{0p} существенно отличается от исходной, то величину a уточняют и расчёт U_{0p} повторяют.

Для определения оптимальной величины давления энергоносителя (воздуха или рабочей жидкости) были проведены экспериментальные исследования на опытных образцах из материала ЭИ 698-ВД. Упрочнение образцов стеклянными и стальными микрошариками осуществлялось на двух установках – гидродробеструйной и пневмодробеструйной соответственно. Предварительно по кривым насыщения прогибов контрольных пластинок было найдено оптимальное время обработки (упрочнения) единицы поверхности детали $\tau_{\text{опт}}$. На каждом режиме было упрочнено по 4 образца для определе-

ния ОН и по 3 образца для сравнительных усталостных испытаний. Определение ОН осуществлялось способом электролитического травления на установке АСБ - 1. На основе эпюр ОН для каждого упрочненного были рассчитаны эпюра распределения начальных напряжений σ_n , эквивалентные начальные напряжение $\sigma_э$, толщина поверхностного слоя a и его удельная энергия U_0 . Поскольку данные испытания носят оценоч-

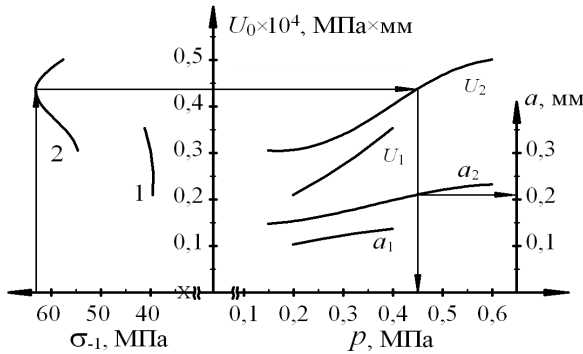


Рис. 2. Номограмма для определения давления рабочего энергоносителя
 1, U_1, a_1 – зависимости σ_{-1}, U_0 и a для стеклянных микрошариков;
 2, U_2, a_2 – зависимости σ_{-1}, U_0 и a для стальных микрошариков

ный и сравнительный характер, то был выбран ускоренный метод. Режимы упрочнения и результаты исследований приведены в табл. 1. По результатам испытаний и расчетов была построена номограмма (рис. 2),

связывающая предел выносливости и основной параметр режимов упрочнения – давление энергоносителя. Данная номограмма использовалась для выбора режима упрочнения лопаток компрессора и диска турбины низкого давления ГТД.

В заключение отметим, что в соответствии с изложенным процесс назначения режимов упрочнения должен осуществляться в следующем порядке.

1. По предварительно найденной экспериментальной зависимости $\sigma_{-1} - U_0 - a - p$, представленной в виде номограммы (рис. 2.), исходя из максимальной или заданной величины предела выносливости детали σ_{-1} определяют соответствующие ему величины U_0 эфф, a , назначают эффективный режим упрочнения – $p_{эфф}$, а также определяют величину эквивалентных напряжений $\sigma_{эфф}$:

$$\sigma_{эфф} = \sqrt{\frac{E}{(1-\mu)a} U_{0\ эфф}} = \frac{1}{1-\mu} \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_{н\ эфф}^2 d\xi}. \quad (12)$$

2. По величине $\sigma_{эфф}$ вычисляют деформации Δ_j эфф при условии упрочнения детали по всей необходимой поверхности и сравнивают их с соответствующими технологическими допусками Δ_j пред. Если выполняется условие Δ_j эфф \leq Δ_j пред, то проводят упрочнение детали по всей расчётной поверхности.

Таблица 1 - Параметры режимов упрочнения опытных образцов

Тип и диаметр микрошариков $d_{ш}$	№ режима упрочнения	Давление энергоносителя p , МПа	Средние величины характеристик		
			Толщина слоя a , мм	Удельная энергия слоя $U_0 \times 10^4$, МПа·м	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
Не упрочненные образцы					332,89
Стеклянные \varnothing 250 мкм	1	0,2	0,103	2,095	395,18
	2	0,3	0,122	2,736	395,37
	3	0,4	0,137	3,533	411,46
Стальные \varnothing 315 мкм	4	0,15	0,147	3,051	545,38
	5	0,3	0,173	3,391	562,59
	6	0,45	0,210	4,375	630,20
	7	0,6	0,232	5,003	574,80

3. Если условие не выполняется, то в соответствии с (7) определяют зоны ответственных участков поверхности и соответствующую им допускаемую величину $[\Delta_j]$.

4. Для определения режима упрочняющей обработки оставшейся неотответственной поверхности задаются “единичной” величиной $\sigma_{\sigma 1}^1$ и вычисляют соответствующие $\Delta_{1,j}$, $U_{0,1}$ и U_{0p} .

5. На основе номограммы (рис. 2) по величине U_{0p} уточняют толщину слоя a . Если полученная величина a незначительно (в пределах 3...5%) отличается от исходной, то по U_{0p} находят соответствующую величину давления $p_{эфф}$. В противном случае уточняют величину a и расчёт повторяют в соответствии со схемой (13):

$$\sigma_{-1} \rightarrow U_{0эфф} \rightarrow \{a, \sigma_{эфф}\} \rightarrow \{\Delta_{jэфф} \leftrightarrow \Delta_{jпред}\} \rightarrow$$

$$\rightarrow [\Delta_j] \rightarrow \sigma_{\sigma 1}^1 \rightarrow \{\Delta_{1,j}, U_{0,1}\} \rightarrow U_{0p} \rightarrow \{a, p_{эфф}\} \quad (13)$$

В ряде случаев возникает необходимость в устранении недопустимых деформаций, образовавшихся в процессе изготовления детали. В этом случае нужно подбирать не только режимы упрочнения, но и место расположения и размеры участков, которые следует обрабатывать. Эта задача решается аналогично по схеме (13), где в качестве $[\Delta_j]$ принимают величину деформаций, которые нужно устранить.

Библиографический список

1. Букатый, С.А. Прогнозирование коробления деталей ГТД после обработки поверхности на основе исследования остаточного напряжённого состояния материала [Текст]: дис. ... докт. техн. наук : 05.07.05, 01.02.06 / С.А. Букатый. – Рыбинск, 1996. – 265 с.
2. Букатый, А. С. Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учетом геометрии упрочняемых деталей [Текст] / А. С. Букатый // *Авиация и космонавтика* 2008: Тезисы седьмой междунар.

конф. Тезисы докладов – М.: МАИ, 2008. – 236 с. С. 68.

3. Биргер, И. А. Остаточные напряжения [Текст] / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1963. – 232 с.

4. Исаев, А. И. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое [Текст] / А.И. Исаев, А.Н. Овсенко. // *Вестник машиностроения*. – М.: Машиностроение, 1967. – № 8. – С. 74–76.

5. Овсенко, А. Н. Технологические основы методов снижения остаточных деформаций и обеспечения качества обработки высоконагруженных деталей энергомашин [Текст]/А.Н.Овсенко.–автореф....докт. техн. наук : 05.02.08; 01.02.06 / ЦНИИТМАШ. -М., 2006. – 32 с.6.

References

1. Bukatyi S.A. Prediction of the Gas turbine parts hogging after surface strengthening based on the research of the residual stress of material: thesis for a Doctor's degree: 05.07.05, 01.02.06 / S.A. Bukatyi. – P., 1996. – 265 p.
2. Bukatyi A.S. Rational regimes of the surface strengthening of the Gas turbine parts in the basis of geometry of the parts / A.S. Bukaty // 7 International Conference "Aviation and Cosmonautic - 2008": Thesis - M.: Publisher MAI-PRINT, 2008. – 236 p. P. 68.
3. Birger, I. A. Residual stress / I.A Birger // M.: Mashinostroenie, 1963. – 232 p.
4. Ovseenko A. N. Selection of the optimum thickness of the samples for the residual stress determination in the surface / A.N. Isaev, A.N. Ovseenko // *Vestnik mashinostroenia*. – 1967. – p. 74-76.
5. Ovseenko A. N. The technological basis of the residual deformation lowering method and quality maintenance of the processing of the high-loaded parts: thesis for a Doctor's degree: 05.02.08; 01.02.06 / A.N. Ovseenko – CNIITMASH. – M., 1986. – 32 p.6.

THE DETERMINATION OF THE EFFICIENT PARAMETERS OF SURFACE STRENGTHENING THE THIN-WALLED AND THE SMALL-HARD PARTS OF GAS TURBINE ENGINES BASED ON DEFORMATION TOLERANCE

© 2009 S. A. Bukaty¹, A. S. Bukaty²

¹Rybinsk state aviation technological academy

²"NPO "Saturn" Corporation

The energetic method for determination of the efficient parameters of strengthening has been developed on the basis of the analysis of the residual stress of parts as well as on the initial stress conception. This method provides the increase of the endurance strength and the relationship of parts within the limits of technological tolerance. The realization of the method is described on the example of shot peening strengthening.

Surface strengthening, residual and initial stresses, technological residual deformations, the energy surface layer, parameters of strengthening, nomogram

Информация об авторах

Букатый Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Рыбинской государственной авиационной технологической академии, директор Научно-коммерческой фирмы «СБК». Тел. (4855) 213-964. E-mail: bukaty_sa@mail.ru. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, малоцикловая усталость, механика разрушения.

Букатый Алексей Станиславович, инженер НПО «Сатурн», аспирант кафедры Сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (4855) 296-255. E-mail: bukaty@inbox.ru. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, компьютерное моделирование и расчёты на прочность.

Bukatyi Stanislav Alekseevich, Doctor of Science, Professor of the chair of theoretical mechanic and strength of materials of Rybinsk state aviation technological academy, LTD Scientific-business firm "SBK" Director. Phone: (4855) 213-964. E-mail: bukaty_sa@mail.ru. Area of research: Residual stress and strains, strengthening technologies, low-cycle fatigue, fracture mechanics.

Bukatyi Alexey Stanislavovich, engineer, "NPO "Saturn" Corporation, post-graduate student of the chair "Strength of materials" of Samara State Aerospace University. Phone: (4855) 296-255. E-mail: bukaty@inbox.ru. Area of research: Residual stress and strains, strengthening technologies, model engineering and strength design.