

УДК 621.438

Д-р техн. наук А.Я. Качан, С.А. Уланов

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

В работе представлены критерии оценки стабильности выходных параметров процессов обработки деталей ГТД, которые включают следующие коэффициенты: коэффициент стабильности составляющей силы резания при шлифовании, коэффициент вариации среднего значения предела выносливости детали после обработки и коэффициент живучести детали.

На основе представленных коэффициентов проведен анализ различных процессов обработки лопаток компрессора, где показаны преимущества и недостатки исследуемых вариантов технологии.

**Ключевые слова:** детали ГТД, критерии оценки, предел выносливости, коэффициент стабильности, коэффициент вариации, коэффициент живучести.

Одним из важных показателей, характеризующих уровень применяемых технологий, особенно на финишных операциях обработки деталей, является стабильность выходных параметров процесса.

Стабильность выходных параметров процесса обработки деталей вносит значительный вклад в обеспечение качества их несущих поверхностей, а, следовательно, и в повышение ресурса и надежности авиационных двигателей [1–3].

Поэтому разработка и исследование критериев для оценки стабильности выходных параметров процессов обработки деталей является важной и актуальной.

**Цель работы** – разработка и выбор критериев и их применение для оценки выходных параметров процессов обработки деталей ГТД.

При оценке вариантов схем формообразования сложнопрофильных поверхностей наиболее предпочтительной следует считать схему, которая обеспечивает более высокую стабильность выходных параметров процесса [1, 3].

Стабильность выходных параметров при шлифовании в полной мере предопределяется стабильностью сил шлифования, например, составляющей  $P_z$ , которую можно оценить посредством коэффициента стабильности  $\lambda_{P_z}$ :

$$\lambda_{P_z} = \frac{P_z - \Delta P_z}{P_z} = 1 - \frac{\Delta P_z}{P_z}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_z$  – абсолютная величина отклонения фактической составляющей силы резания от оптимальной.

Величину отклонения  $\Delta P_z$  можно выразить через передаточную функцию, принимая функцию  $P_z$  линейной в диапазоне  $\Delta \varepsilon_i$

$$\Delta_i P_z = \frac{\partial P_z}{\partial \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_i, \quad (2)$$

где  $\frac{\partial P_z}{\partial \varepsilon_i}$  – передаточная функция;  
 $\Delta \varepsilon_i$  – изменение значения аргумента.

Изменение функции  $P_z$  от непостоянства ее аргументов составит:

$$\Delta P_z = \sum_{i=1}^n \Delta_i P_z, \quad (3)$$

где  $n$  – число аргументов функции  $\Delta P_z$ .

С учетом выражения  $\Delta P_z$  из уравнения (3)

коэффициент стабильности  $\lambda_{P_z}$  из уравнения (1) примет вид:

$$\lambda_{P_z} = 1 - \frac{1}{P_z} \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_z}{\partial \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_i. \quad (4)$$

При изменении только одного параметра коэффициент стабильности определяется следующим образом:

$$\lambda_{iP_z} = 1 - \frac{\partial P_z}{\partial \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_i \cdot \frac{1}{P_z} \quad (5)$$

Обозначим  $\eta_i = \frac{1}{P_z} \cdot \frac{\partial P_z}{\partial \varepsilon_i}$ , которая характеризует чувствительность схемы к изменению данного параметра, тогда:

$$\lambda_{iP_z} = \eta_i \Delta \varepsilon_i. \quad (6)$$

Влияние схем формообразования шлифованием профилей спинки и корыта пера лопаток на стабильность сил шлифования можно также оценить в соответствии с принятым критерием стабильности  $\lambda_{P_z}$ .

Рассматриваются две схемы обработки, основным отличием которых является способ подачи на строку.

В соответствии с первой схемой (рис. 1) подача на строку осуществляется поступательным перемещением инструмента вдоль оси лопатки, а в соответствии со второй схемой, подача на строку инструмента осуществляется периодическим поворотом лопатки (рис. 2).

В соответствии с [4] силы резания для первой и второй схем формообразования имеют вид:

$$P_z^s = \tau_p \cdot V \cdot k \cdot \rho \cdot S_c \cdot t / 60 \cdot V_u \cdot (\rho \pm r_u), \quad (7)$$

$$P_z^{\gamma_c} = \tau_p \cdot V \cdot k \cdot t \cdot \gamma_c \cdot \rho / 60 \cdot V_u \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) запишем в виде:

$$P_z^s = K \frac{\rho}{\rho \pm r_u}, \quad (9)$$

$$P_z^{\gamma_c} = K \cdot \rho, \quad (10)$$

где  $K = \tau_p \cdot V \cdot k \cdot S_c \cdot t / 60 \cdot V_u$ ;

$K = \tau_p \cdot V \cdot k \cdot t \cdot \gamma_c / 60 \cdot V_u$ ;

$\tau_p$  – напряжение сдвига при резании, Па;  
 $V$  – скорость копания, м/мин;  
 $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от угла трения и переднего угла;

$S_c$  – подача на строку, мм;

$\gamma_c$  – угол поворота на строку, рад.;

$t$  – глубина резания, мм;

$V_u$  – скорость резания, м/с;

$\rho$  – радиус кривизны кривой, образующей сечение лопатки, мм;

$r_u$  – радиус кривизны инструмента, мм.

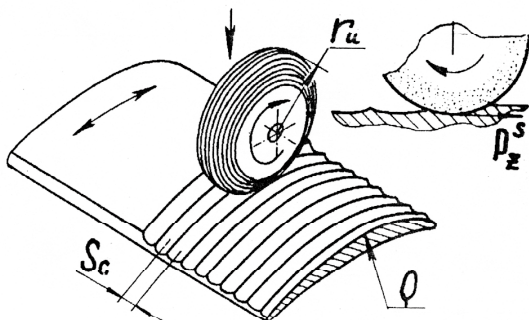


Рис. 1. Схема обработки пера лопатки поперечными строчками

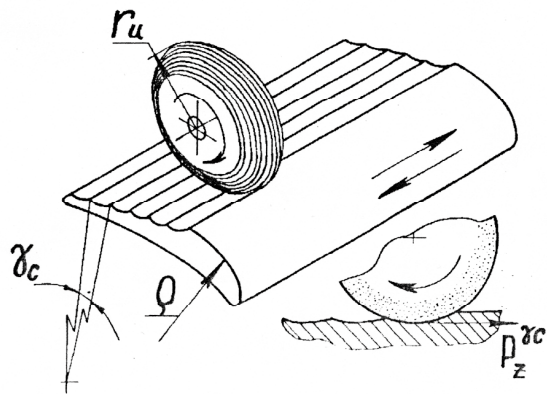


Рис. 2. Схема обработки пера лопатки продольными строчками

Продифференцируем уравнения (9) и (10) и запишем в отклонениях:

$$\Delta P_z^s = K \frac{r_u}{(\rho \pm r_u)^2} \Delta \rho, \quad (11)$$

$$\Delta P_z^{\gamma_c} = K \cdot \Delta \rho. \quad (12)$$

С учетом уравнений (11) и (12), а также уравнений (7) и (8), получим выражения для коэффициентов стабильности каждой из оцениваемых схем формообразования:

$$\lambda_{P_z}^s = 1 - \frac{r_u}{\rho} \left( \frac{1}{\rho \pm r_u} \right) \Delta \rho, \quad (13)$$

$$\lambda_{P_z}^{\gamma} = 1 - \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (14)$$

В соответствии с полученными уравнениями построены графические зависимости для коэффициентов стабильности сил шлифования для каждой из схем формообразования в относительных единицах  $\rho/r_u$  (рис. 3).

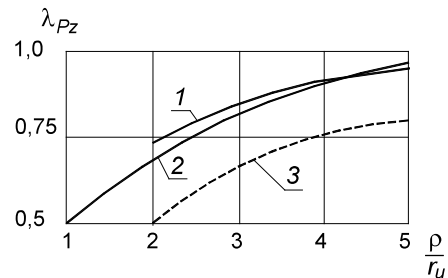


Рис. 3. Зависимость коэффициентов стабильности сил шлифования  $\lambda_{P_z}$  для двух схем формообразования пера

лопатки от относительной кривизны  $\rho/r_u$   
 1 – для корыта при формообразовании по схеме рис.1; 2 – для спинки при формообразовании по схеме рис.1; 3 – для корыта при формообразовании по схеме рис.2

Для оценки уровня долговечности при напряжениях выше предела выносливости применяется коэффициент живучести  $K_i$  [2].

Живучесть характеризуется относительным количеством циклов до разрушения

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot N_i}{n \cdot N_6 \cdot \sigma_{-1}^p},$$

где  $\sigma_i$  и  $N_i$  – напряжение и число циклов до разрушения лопаток при испытаниях на усталость;

$n$  – число лопаток, испытанных на уровнях напряжений, выше рассчитанного значения  $\sigma_{-1}$ ;

$N_6$  – базовое число циклов при испытаниях лопаток на усталость ( $2 \cdot 10^7$  циклов);

$\sigma_{-1}$  – предел выносливости лопаток, МПа.

Стабильность свойств поверхностного слоя образца определяется коэффициентом вариации ( $v$ ) среднего значения предела выносливости

$$v = \frac{\bar{S}_{\sigma_{-1}}}{\sigma_{-1}},$$

где  $\bar{S}_{\sigma_{-1}}$  – среднеквадратическое отклонение предела выносливости.

В табл. 1 представлены результаты испытаний лопаток из сплава ВТ8М компрессора на усталость с указанием коэффициентов живучести  $K_i$  и вариации  $v$  [2].

Наименьшее рассеяние  $\sigma_{-1}$   $v = 0,011$  наблюдается для комбинированной обработки виброполирование + ПДУ.

Таблица 1

Параметры выносливости лопаток после обработки различными отделочно-упрочняющими методами

Параметры выносливости	Методы обработки			
	Виброполирование	Глянцевание кромок+УЗУ	Глянцевание кромок+ПДУ	Виброполирование+ПДУ
$\bar{\sigma}_{-1}$ , МПа	575	625	615	592
$\bar{S}_{\sigma_{-1}}$ , МПа	54,1	55,3	47,7	6,8
$K_i$	0,64	0,494	0,476	0,553
$v$	0,094	0,088	0,078	0,011

Коэффициент живучести  $K_i$  для рассматриваемых технологических методов находится практически на одном уровне.

#### Выводы

В работе представлены критерии оценки выходных параметров процессов обработки деталей ГТД, позволяющие анализировать степень влияния различных технологий на параметры качества их изготовления.

Показано, что наиболее приемлемыми критериями для оценки выходных параметров процессов обработки деталей ГТД являются коэффициент стабильности составляющей силы резания, коэффициент вариации и коэффициент живучести.

Проведен анализ методов обработки на основе предложенных критериев, где выявлены рациональные схемы и методы обработки рабочих лопаток компрессора ГТД.

#### Список литературы

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД: монография. Ч.1. Лопатки компрессора и вентилятора / [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д., Качан А. Я. и др.]. – Запорожье: изд-во АО «Мотор Сич», 2003. – 369 с.
2. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / [Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье: изд-во АО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
3. Качан А.Я. Влияние параметров схем формообразования на стабильность сил шлифования / Качан А.Я., Петренко А.П. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета: сб. научн. тр. – Харьков. ХГПУ. – 1999. – Вып. 42. – С. 110 –113.
4. Юнусов Ф.С. Формообразование сложно-профильных поверхностей шлифованием. – М.: «Машиностроение», 1987. – 248 с.

Поступила в редакцию 31.05.2016

**Качан О.Я., Уланов С.О. Критерії оцінки вихідних параметрів процесів обробки деталей ГТД**

*У роботі представлено критерії оцінки стабільності вихідних параметрів процесів обробки деталей ГТД, які включають наступні коефіцієнти: коефіцієнт стабільності складової сили різання при шліфуванні, коефіцієнт варіації середнього значення границі витривалості деталі після обробки і коефіцієнт живучості деталі.*

*На основі представлених коефіцієнтів проведено аналіз різних процесів обробки лопаток компресора, де показано переваги та недоліки досліджуваних варіантів технології.*

**Ключові слова:** деталі ГТД, критерії оцінки, границя витривалості, коефіцієнт стабільності, коефіцієнт варіації, коефіцієнт живучості.

**Kachan A.Y., Ulanov S.A. Assessment criteria for output parameters of gas turbine engine parts processing**

*The report presents assessment criteria for output parameter stability of gas turbine engine parts processing, including the following factors: stability factor of cutting force component during grinding, variation factor of part mean endurance limit after processing and part survivability factor.*

*Based on the presented factors, the analysis of different compressor blades processing operations was carried out, where advantages and disadvantages of the processing options in question were demonstrated.*

**Key words:** gas turbine engine parts, assessment criteria, endurance limit, stability factor, variation factor, survivability factor.