

---

---

## ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАБОТЕ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПО ВРЕМЕНИ ТЕМПЕРАТУРОЙ ГАЗА ПЕРЕД ТУРБИНОЙ

Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, Е.В. Собенников,  
Е.В. Белова

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей  
Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Долговечность рабочих лопаток газотурбинной установки (ГТУ) уменьшается на 25—35% при медленных циклических изменениях температуры, связанных с работой на частичных нагрузках. Повышение долговечности охлаждаемых лопаток может быть получено за счет сохранения их постоянной температуры путем регулирования расхода охлаждающего воздуха.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, охлаждение лопаток, пределы прочности и текучести.

Долговечность и ресурс — это срок службы газотурбинной установки (ГТУ) до капитального ремонта. Опыт эксплуатации [1; 2] показывает, что долговечность определяется главным образом работоспособностью жаровых труб камеры сгорания и лопаток турбины. Замена жаровых труб занимает сравнительно мало времени и производится в процессе эксплуатации [1]. Замена лопаток турбины, особенно рабочих, производится при капитальном ремонте. Ниже рассматривается влияние медленно меняющейся температуры газа на срок службы рабочих лопаток.

Современные стационарные ГТУ (энергетические и ГТУ газоперекачивающих станций) должны иметь срок службы в десятки тысяч часов. На долговечность лопаток сильно влияет изменение их температуры. Наибольшие скачки температур происходят при пуске. Но и при рабочих режимах происходят изменения температур вследствие изменения мощности потребителя и температуры окружающей среды. Энергетические ГТУ испытывают изменения нагрузки по времени суток, газоперекачивающие агрегаты (ГПА) — при изменении расхода газа.

Влияние резких скачков температуры газа при пуске на ресурс ГТД хорошо известно. Так, авиационный турбовинтовой двигатель (ТВД) АИ-20 при установке на самолетах, летающих на длинных линиях, имеет вдвое больший ресурс, чем на самолетах, работающих на коротких линиях [1; 3]. Однако и при редких пусках срок службы горячих деталей снижается из-за сравнительно медленных изменений температуры газа, связанных с изменением нагрузки.

При повышенных температурах (более 500—600 °С) происходит непрерывное нарастание деформации даже в том случае, если механические напряжения ниже предела упругости. Это явление называется ползучестью (крип). Предел ползучести ниже предела прочности  $\sigma_B$ , например, у хромоникелевого сплава ЭИ437Б (20% хрома и 75% никеля) в диапазоне температур 600—800 °С величина  $\sigma_{0,2}$  составляет 60—70% от  $\sigma_B$ .

Имеются параметрические зависимости, связывающие напряжения, время и температуру сплавов [4; 6].

Уравнение Манкмана—Гранта связывает скорость ползучести  $\upsilon$  с временем до разрушения  $\tau$ :

$$\tau \upsilon^m = c,$$

где  $c$  и  $m$  — постоянные,  $\tau$  — срок службы, ч.

Широкое применение получил параметр Ларсена—Миллера

$$P = T(c + \lg \tau), \quad (1)$$

где  $T$  — температура, К;  $c$  — постоянная, равная около 20 у хромоникелевых сплавов.

Испытания, проведенные в Центральном котлотурбинном институте, НИИ черной металлургии, Центральном институте авиационного моторостроения и в других организациях, позволили получить зависимость  $\sigma = f(p)$  (рис. 1), которая практически не зависит от температуры. Задавшись сроком службы и температурой, из (1) определяют  $P$ , и по графику (рис. 1) находят допускаемое напряжение  $\sigma$ .

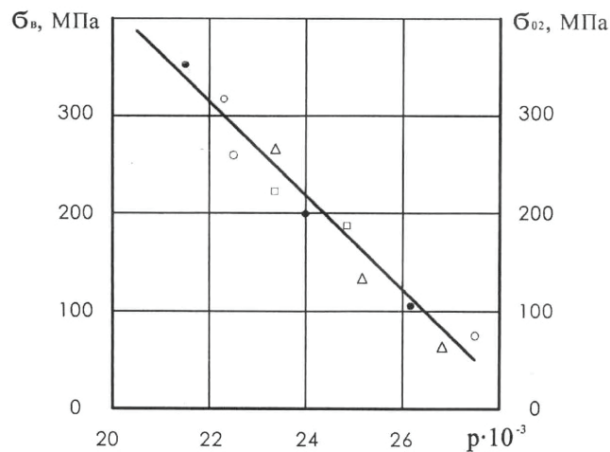


Рис. 1. Зависимость пределов прочности  $\sigma_b$  и ползучести  $\sigma_{02}$  от параметра Ларсена—Миллера

Опыты показывают, что при повторных нагревах деталей из жаропрочных сплавов их долговечность снижается по сравнению с той, какой она была бы при постоянном длительном нагреве [4; 5]. Был испытан образец из хромоникелевого сплава ЭИ-929 при  $t = 850$  °С, причем каждые 2 часа в течение 10 минут температура поднималась до 950 °С. Испытания показали, что пределы прочности и ползучести снизились до 30% от той величины, которая была бы при постоянной температуре. Можно считать, что  $\sigma^m t = \text{const}$ , причем у сплава ЭИ-437Б  $m = 5—6$  [4].

При циклическом изменении температуры существенно повышается скорость ползучести. Для определения связи числа циклов  $N$  и пластической деформации  $\epsilon_0$ , вызванной ползучестью, предложено уравнение [5]

$$\epsilon_0 = N^{0,5} = \text{const}. \quad (2)$$

Из этого уравнения следует, что при увеличении числа циклов с 1 до 100 пластическая деформация растет в 10 раз.

Зависимость предела прочности от колебания температуры  $\Delta t$  дает формула [6]

$$\sigma_B = \sigma_0 e^{-k\Delta t}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  — предел прочности при исходной температуре;  $e = 2,718$ ;  $k = 0,77 \cdot 10^{-2}$ .

Расчет по формуле (3) показывает, что при колебаниях температуры  $\Delta t = \pm 50$ — $100$  °C предел прочности снижается в 2,16 раза.

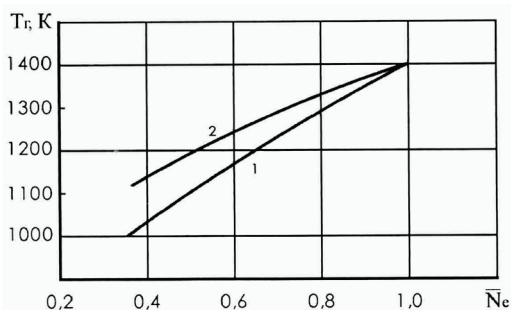
Зависимость предела прочности от срока службы дает уравнение

$$\sigma_B = \sigma_0 \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (4)$$

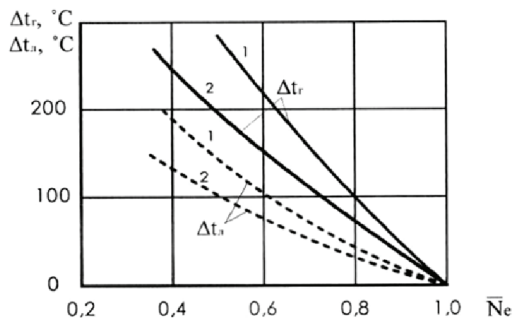
где  $m = 0,14$ ;  $\tau_0$  и  $\tau$  — исходный и искомый срок службы в часах.

На рис. 2 показаны зависимости температуры газа перед турбиной ВДГТУ от относительной мощности  $\bar{N}_e = \frac{N_B}{N_{B_0}}$  ( $N_{B_0}$  — мощность на номинальном режиме) для одновалвных (1), двухвалвных и трехвалвных (2) установок. Видно, что при снижении мощности до 40% от полной в одновалвной ГТУ температура газа снижается от 1400 до 1500 К и  $\Delta t_r = 350$  °C. При таком же снижении мощности двухвалвных и трехвалвных ГТУ  $t_r$  снижается до 1150 К ( $\Delta t_r = 250$  °C).

На рис. 3 показана зависимость  $\Delta t_r$  и  $\Delta t_l$  от  $\bar{N}_e$  для одновалвной (1) двухвалвной/трехвалвной (2) ГТУ. Из графиков следует, что температура рабочих лопаток  $t_l$  меняется меньше, чем температура газа. Это объясняется, во-первых, тем, что температура торможения газа на рабочей лопатке  $T_w \approx (0,85—0,9) T_r$  на 10—15% ниже температуры газа; во-вторых, при воздушном охлаждении рабочих лопаток их температура  $T_l$  и колебания температуры по режимам существенно ниже, чем  $\Delta t_r$ . Тем не менее при  $\bar{N}_e = 0,5$  снижение температуры лопатки составляет у одновалвной ГТУ на 150 °C, у двухвалвных/трехвалвных на 100 °C.



**Рис. 2.** Зависимость температуры газа перед турбиной ВД от относительной мощности ГТУ:  
1 — одновалвная; 2 — двух- и трехвалвная



**Рис. 3.** Зависимость уменьшения температуры газа  $\Delta t_r$  и рабочих лопаток  $\Delta t_l$  от относительной мощности ГТУ:  
1 — одновалвная; 2 — двух- и трехвалвная

Зависимости предела прочности  $\sigma_B$  и предела ползучести  $\sigma_{0,2}$  от  $\Delta t_{л}$  при разных осредненных за цикл температурах лопаток приведены на рис. 4. Кривые получены для жаропрочных хромоникелевых сплавов с помощью формул (1)—(3). Из приведенных кривых видно, что при  $\Delta t_{л} = \pm 50—100$  °С предел прочности снижается от 420 до 240 МПа, т.е. на 43%. При снижении температуры  $\sigma_B$  составляет 37%.

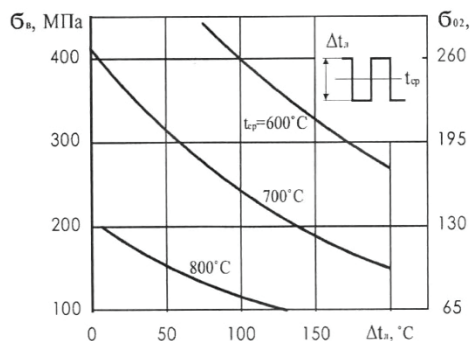
Зависимость пределов прочности и текучести от срока службы  $\tau$  можно получить с помощью параметра Ларсена—Миллера (1). Результаты расчета при  $t_{л} = 700$  °С приведены в таблице.

Таблица

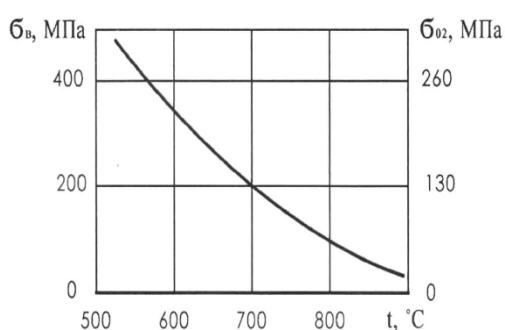
**Зависимость пределов прочности и текучести от срока службы  $\tau$**

$\tau$ , ч	100	1000	10 000	1 000 000
$\sigma_B$ , МПа	400	283	200	142
$\sigma_{0,2}$ , МПа	260	184	130	92

При увеличении срока службы со 100 ч (характерного для первых авиационных ГТД) до 100 000 ч допускаяемые напряжения уменьшаются в 2,8 раза. Зависимость предела прочности сплава ЭИ-437Б ( $\approx 75\%$  Ni и 20% Cr) от температуры при сроке службы 100 000 часов приведена на рис. 5.



**Рис. 4.** Зависимость пределов прочности  $\sigma_B$  и ползучести  $\sigma_{0,2}$  от  $t_{л}$  при различных средних по времени температурах лопаток  $\Delta t_{ср}$  для сплава ЭИ 437Б ( $\tau = 100$  ч)



**Рис. 5.** Зависимость пределов прочности  $\sigma_B$  и ползучести  $\sigma_{0,2}$  от температуры ( $\tau = 10\,000$ ) для сплава ЭИ 437Б

Из (5) следует, что можно при уменьшении  $t_w$  на частичных нагрузках сохранить постоянную температуру лопатки за счет снижения  $f$ . Для этого нужно снизить  $\alpha_B$  за счет уменьшения расхода воздуха через компрессор ВД ГТУ. Расчеты показывают, что за счет уменьшения этой цифры в 2—3 раза в диапазоне  $\bar{N}_g = 0,4—1,0$  можно получить  $t_{л} = \text{const}$ . Как следует из кривых рис. 4, это позволит увеличить срок службы лопаток на 25—35%.

Температура конвективно охлаждаемой воздухом рабочей лопатки

$$t_{л} = \frac{t_w + f t_B}{1 + f}, \quad (5)$$

где  $f = \frac{\alpha_B u_B}{\alpha_T u_T}$ ,  $\alpha_B$  и  $\alpha_T$  — коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха и газа;  $u_B$  и  $u_T$  — периметры охлаждаемых поверхностей.

**Выводы.** Срок службы рабочих лопаток турбин ГТУ определяется ползучестью сплавов. Зависимость пределов прочности и ползучести от температуры и срока службы можно найти с помощью параметра Ларсена—Миллера.

Циклические изменения температуры лопаток на  $\Delta t_{\text{д}} = \pm 50$ —100 °С снижают  $\alpha_B$  и  $\alpha_T$  в 1,25—1,35 раза.

Для увеличения срока службы охлаждаемых воздухом рабочих лопаток на 25—35% можно предложить уменьшение расхода охлаждающего воздуха на частичных нагрузках, с тем чтобы температура лопаток на всех режимах была постоянной и близкой к таковой на полной мощности.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Акимов В.М.* Основы надежности ГТД. — М.: Машиностроение, 1950. [*Akimov V.M.* *Osnovy nadezhnosti GTD.* — М.: Mashinostroenie, 1950.]
- [2] *Лозовский В.Н. и др.* Диагностика авиационных двигателей. — М.: Машиностроение, 1988. [*Lozovskij V.N. i dr.* *Diagnostika aviatsionnyh dvigatelej.* — М.: Mashinostroenie, 1988.]
- [3] *Барский И.А., Куватова Г.Г.* Температура и термические напряжения в турбинных лопатках на неустановившихся режимах // ИВУЗ Машиностроение. — 2005. — № 4. [*Barskij I.A., Kuvatova G.G.* *Temperatura i termicheskie naprjagenija v turbinnnyh lopatkah na neustanovivshijsja regimah* // *IBUZ Mashinostroenie.* — 2005. — N 4.]
- [4] *Сизова Р.Н.* Факторы, влияющие на надежность материалов при длительном статическом нагружении // Ресурс и надежность ГТД. — М., 1985. — Вып. II. [*Sizova R.N.* *Factory, vlijajushie na nadezhnost materialov pri dlitelnom staticheskom nagruzenii* // *Resurs i nadezhnost GTD.* — М., 1985. — Выр. II.]
- [5] *Гецов Л.Б.* Поведение жаропрочных материалов при циклических температурах и напряжениях. — М.: Госэнергоиздат, 1980. [*Gecov L.B.* *Povedenie garoprothnyh materialov pri ciklitheskikh temperatururah i naprjagenijah.* — М.: Gosenergoizdat, 1980.]
- [5] *Robinson El.* *Trans.* AMSE. — 1982. — V. 74, #5. — P. 777—781.

## OVERHAUL TIME OF GAS TURBINE BY TEMPERATURE CHANGE

**J.A. Antipov, I.K. Shatalov, E.V. Sobennikov**

Department of heating engineers and heat engines  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

Overhaul time of gas turbine by temperature change. Overhaul time of blades decreased on 25—35% when temperature slow changed owing to work on part load. Overhaul life of cooling blades bay be increase if air flow control retain permanent blade temperature.

**Key words:** gas turbine, cooling blade, tensile and creep strength.