

УДК 620.179.13

С.В. ЕПИФАНОВ¹, А.В. ОЛЕЙНИК¹, В.Г. ПЕРЕТЁРТОВ¹, А.Г. ЧУМАКОВ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²Московское машиностроительное производственное предприятие «Салют», Россия

ОЦЕНКА РЕСУРСА ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ С ВИХРЕВОЙ МАТРИЦЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Представлена методика прогнозирования изменения ресурса турбинной лопатки, охлаждаемой с помощью вихревой матрицы, при наличии в ней дефекта, выявленного методом тепловой дефектоскопии. Методика позволяет оценивать предельные параметры дефектов, выявляемых тепловым контролем.

лопатка турбины, вихревое охлаждение, тепловая дефектоскопия, прогнозирование ресурса

Введение

Ресурс деталей является важной технико-экономической характеристикой авиационного газотурбинного двигателя. Особое место занимает прогнозирование оставшегося ресурса в процессе эксплуатации двигателя. В отличие от стадии проектирования, когда прогнозу подлежат ресурс генеральной совокупности еще не созданных объектов (деталей и двигателя в целом), прогнозирование на стадии эксплуатации выполняют для конкретных, уже существующих, объектов. При этом оценке подлежит остаточный ресурс [1].

Ресурс охлаждаемой турбинной лопатки существенно зависит от состояния каналов системы ее охлаждения. Производственные и эксплуатационные дефекты каналов приводят к изменению количества воздуха, используемого на охлаждение, и его распределения по внутренней охлаждаемой поверхности и, как следствие, к снижению установленного ресурса.

К аналогичным последствиям приводит отложение на стенках каналов твердых частиц, поступающих с потоком охлаждающего воздуха.

Влияние отложений особенно сильно сказывается на лопатках охлаждаемых с помощью вихревых матриц – системы из двух групп каналов, на внутренней поверхности корытца и спинки, имеющих

П-образное поперечное сечение, открытое к средней линии профиля лопатки, направленных к выходной кромке лопатки так, что направление каналов в стенке корытца перпендикулярно направлению каналов в стенке спинки (рис. 1).

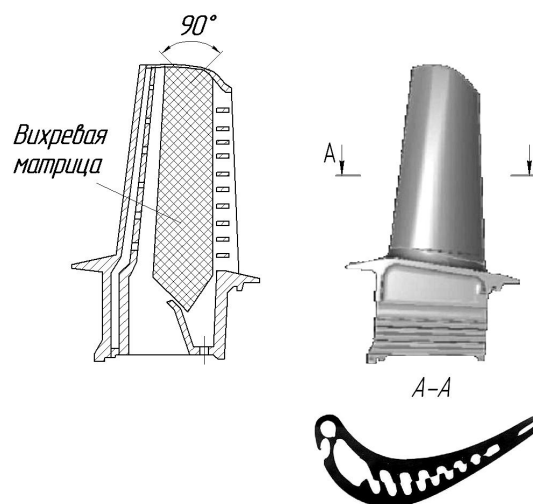


Рис. 1. Лопатка с вихревой матрицей

Результаты проведенных исследований указывают на необходимость периодической очистки каналов вихревых матриц от пылевых отложений и введения технологического контроля расходно-тепловых характеристик лопаток [2].

Дефектацию внутренних каналов лопаток на двигателестроительных предприятиях проводят классическими методами, такими как, рентгеновский, ультразвуковой и др.

В дополнение к рентгеновскому и ультразвуковому контролю в последние годы для дефектации каналов охлаждения применяется тепловой контроль, выявляющий дефекты по искажению температурного поля, создаваемого в лопатке [3, 4].

Цель работы – разработка методики прогнозирования ресурса охлаждаемой турбинной лопатки по результатам тепловой дефектоскопии.

Модель ресурса лопатки с дефектом

Предлагаемая методика дополняет результаты дефектоскопии лопатки оценкой отличия ее ресурса от ресурса эталонной лопатки и получением аналогичных ресурсных характеристик обнаруживаемых дефектов.

Методика ориентирована на методы, нестационарной тепловой дефектоскопии, заключающиеся в тепловизионном контроле динамики температурного поля, возникающего в лопатке, предварительно нагретой до температуры T_0 , при продувке холодного воздуха по системе охлаждения.

Результатами контроля обычно являются поле отклонений локальных температур испытуемой лопатки от «эталонной» ΔT_K , оценка темпа регулярно режима

$$m = -\frac{\partial \ln(T - T_g)}{\partial \tau},$$

где T – температура лопатки,

T_g – температура воздуха,

или иные, связанные с темпом величины [3].

Методика включает выполнение следующих процедур.

1. Компьютерное моделирование температурного и напряженного состояний эталонной лопатки на максимальном эксплуатационном режиме, получение для этого режима поля температуры $T_{ЭКС}(x, y, z)$ и эквивалентных напряжений $\sigma_{ЭКС}(x, y, z)$. Выявление фактора определяющего долговечность лопатки (малоцикловая усталость, длительное статическое нагружение, многоцикловая усталость).

2. Компьютерное моделирование температурного состояния на максимальном эксплуатационном режиме лопатки с «контрольным» дефектом вихревой матрицы.

Определение разности температур дефектной и эталонной лопаток в эксплуатации $\Delta T_{ЭКС}$. Для целей настоящей работы имитация дефекта может заключаться в отсутствии теплоотдачи в ячейке вихревой матрицы $\sim 1 \times 1$ мм.

3. Компьютерное моделирование температурного состояния эталонной лопатки и лопатки с «контрольным» дефектом в номинальных условиях теплового контроля.

Оценка разности температур $\Delta T_{НОМ}$, темпа регулярного режима Δm и других результатов теплового контроля лопатки с контрольным дефектом и эталонной лопатки.

4. Определение коэффициента k_1 в линейной зависимости разности температур эталонной и дефектной лопаток в эксплуатации с разностью этих температур в номинальных условиях контроля:

$$\Delta T_{ЭКС} = k_1 \Delta T_{НОМ} \quad (1)$$

и коэффициента k_2 в пропорциональной зависимости результатов контроля:

$$\Delta T_{НОМ} = k_2 \Delta m (T_{0_{НОМ}} - T_{г_{НОМ}}), \quad (2)$$

где индекс «ном» отмечает величины при номинальных условиях контроля.

5. Определение зависимости относительного изменения долговечности лопатки от изменения ее температуры при эксплуатации.

Если фактором, определяющим долговечность, время до разрушения τ_p , является длительное статическое нагружение, то модели долговечности (Ларсона – Миллера):

$$\lg \tau_p = \frac{P_{Л-М}(\sigma_{ЭКВ})}{T_{ЭКС}} - 20$$

соответствует относительное изменение долговечности:

$$\eta = \frac{\Delta\tau_p}{\tau_p} \approx k_{\text{дл}} \Delta T_{\text{экс}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{дл}} = -2,3 P_{\text{Л-М}}(\sigma_{\text{ЭКВ}}) / T_{\text{экс}}^2$;

$P_{\text{Л-М}}(\sigma_{\text{ЭКВ}})$ – параметр Ларсона-Миллера;

$T_{\text{экс}}$ – температура лопатки в эксплуатации, К.

Если долговечность определяется малоцикловой усталостью (при числе циклов до разрушения $10^3 < N_p < 10^5$), то модели долговечности (Мэнсона):

$$\Delta\sigma \approx 3,5\sigma_b N_p^{-0,12}$$

соответствует относительное изменение циклической долговечности:

$$\eta = \frac{\Delta N_p}{N_p} \approx k_{\text{ц}} \Delta T_{\text{экс}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{ц}} = 8,3 \frac{1}{\sigma_b} \frac{\partial \sigma_b}{\partial T_{\text{экс}}}$,

σ_b – предел прочности.

6. Выражения (1), (2) позволяют связать относительные изменения ресурса (3), (4) с результатом дефектоскопии ΔT или Δm и ее фактическими условиями $T_{0_{\text{фак}}}$ и $T_{\text{в}_{\text{фак}}}$:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{ном}} &= \frac{T_{0_{\text{ном}}} - T_{\text{в}_{\text{ном}}}}{T_{0_{\text{фак}}} - T_{\text{в}_{\text{фак}}}} \Delta T; \\ \eta &\approx k_1 k_3 \Delta T_{\text{ном}} \approx \\ &\approx k_1 k_2 k_3 \frac{T_{0_{\text{ном}}} - T_{\text{в}_{\text{ном}}}}{T_{0_{\text{фак}}} - T_{\text{в}_{\text{фак}}}} \Delta m, \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_3 = k_{\text{дл}} \vee k_{\text{ц}}$

в зависимости от фактора определяющего ресурс лопатки в эксплуатации; индекс «фак» отмечает фактические условия дефектоскопии.

Оценивание параметров модели

Методика опробовалась применительно к условиям нестационарной тепловой дефектоскопии лопаток на установках лаборатории неразрушающего контроля ММП «Салют» [3].

Использовалась методика CFD-моделирования лопаток с кампланарными каналами и их фрагментов, описанная в работе [4].

Результаты расчетов полей температуры и напряжений в условиях эксплуатации представлены на рис. 2.

При моделировании «контрольного» дефекта воспроизводилось отсутствие теплоотдачи в ячейке вихревой матрицы $\sim 1 \times 1$ мм.

Моделирование теплового и напряженного состояний эталонной лопатки и лопатки с контрольным дефектом в условиях эксплуатации и тепловой дефектоскопии позволило оценить коэффициенты модели (5) значениями [5]:

$$k_1 = 2,2 ;$$

$$k_2 = 8 \text{ с} ;$$

$$k_3 = k_{\text{дл}} = -0,046 \text{ 1/К.}$$

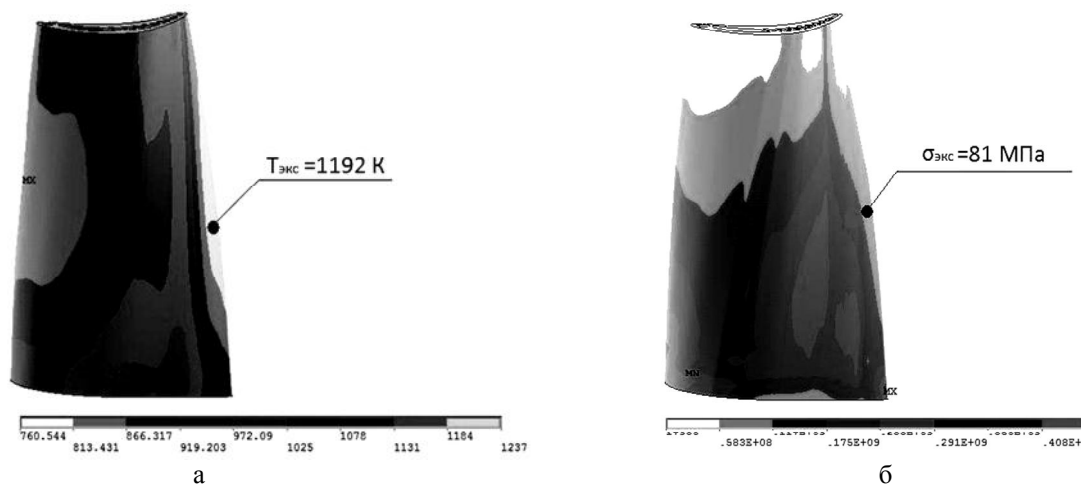


Рис. 2. Расчетные поля температуры, К (а) и напряжений, МПа (б) для условий эксплуатации

Пример дефектоскопии с получением ресурсной характеристики лопатки

В процессе дефектоскопии на установке ММПП «Салют» лопатка, предварительно нагретая до температуры $T_0 = 250$ °С, охлаждается сжатым воздухом, пропускаемым по каналам охлаждения. Нестационарное температурное поле поверхности лопатки регистрируется тепловизором с частотой 1 кадр полного обзора за 1с при разрешающей способности $\sim 1 \times 1$ мм. Установка оснащена датчиком температуры воздуха. Алгоритмы обработки термограмм устраняют влияние неоднородности излучательной

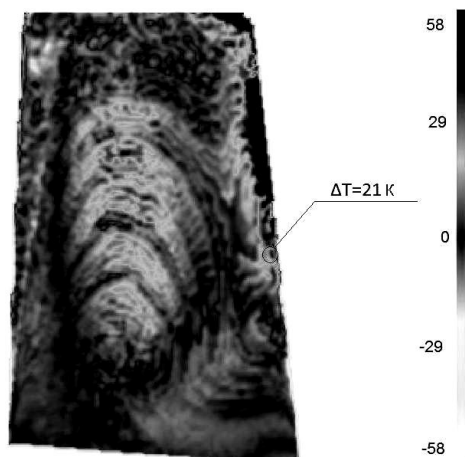


Рис. 3. Прогноз отклонения температуры лопатки в условиях эксплуатации, К

способности поверхности лопатки и интерпретируют локальные аномалии температурного поля как проявление дефектов.

Обработка результатов тепловизионного наблюдения дала поле отклонений локальных температур лопатки в процессе эксплуатации от поля локальных температур эталонной лопатки (рис. 3).

Полученная оценка относительного отклонения ресурса лопатки $\eta \approx 0,9$ позволила считать лопатку дефектной, что подтверждено обнаружением в лопатке не удаленных остатков литейной формы.

Литература

1. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 344 с.
2. Шевченко И.В., Пушкин Ю.Н., Логвиненко Н.В. Влияние пылевых отложений на тепловые характеристики охлаждаемых лопаток турбины // *Авиационная промышленность*. – 2006. – № 4. – С. 47-51.
3. Мельник С.И., Стороженко В.А., Чумаков А.Г., Шутов А.Н. Контроль качества охлаждаемых лопаток турбин методом продувки // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 34. – С. 25-29.
4. Контроль качества охлаждаемых лопаток турбин методом тепловой волны / С.И. Мельник, А.Г. Чумаков и др. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х. ХАІ, 2002. – Вип. 34. – С. 176-180.
5. Моделирование температурного состояния охлаждаемой турбинной лопатки с вихревой матрицей в процессе тепловой дефектоскопии / А.Г. Чумаков, С.В. Епифанов, А.В. Олейник и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 8 (34). – С. 124-128.
6. Перетёртов В.Г. Оценка изменения термонапряженного состояния охлаждаемой лопатки турбины авиационного ГТД по результатам тепловой дефектоскопии // *Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии: Тез. док. межд. науч.-техн. конф. молодых специалистов авиамооторостроительной отрасли*. – Алушта: «Мотор-Сич», 2007. – С. 112-114.

Поступила в редакцию 1.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.