

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА НАЗЕМНОЙ ГТУ ДЛЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

Великанова Н.П.¹, Протасова Н.А.², Великанов П.Г.¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им.А.Н.Туполева-КАИ, г. Казань, pvelikanov@mail.ru

² ООО «АХТЗ», г. Казань, nprotasova@bk.ru

Ключевые слова: рабочая лопатка, долговечность, ресурс, статистический анализ, вероятностный критерий разрушения

Рабочие лопатки (РЛ) турбин газотурбинных двигателей, как авиационных, так и наземных, являются важнейшими деталями, во многом определяющими возможность получения высоких рабочих параметров, ресурса и безопасность работы. Разрушение РЛ турбины, как в полёте, так и на газоперекачивающих станциях, приводит, как правило, к значительным разрушениям внутри силовой установки. Поэтому проблема точного прогнозирования долговечности РЛ, сводящего к минимуму вероятность разрушения, всегда была и остаётся актуальной на всех стадиях создания, доводки и эксплуатации двигателей.

В процессе длительной эксплуатации вследствие деградиционных изменений (эрозия и коррозия лопаток, выработка уплотнений, загрязнение и изменение размеров проточной части двигателя) происходит изменение основных параметров работы двигателей, в частности частот вращения роторов и температур газа в турбине, определяющих напряжённо-деформированное состояние (НДС) роторных деталей турбин.

Конструкционные материалы, применяемые в машиностроении, в том числе и для деталей авиационных ГТД, обладают рассеянием механических свойств и характеристик долговечности. Исходные характеристики рассеяния механических свойств и долговечности материалов деталей турбин под действием деформационного и температурного старения, протекающего в процессе эксплуатации двигателя, имеют тенденцию к изменению, что необходимо учитывать для успешного решения проблемы прогнозирования долговечности. Приведённые аргументы предопределяют необходимость применения методов теории вероятности и математической статистики для оценки и прогнозирования долговечности ответственных деталей, какими являются РЛ турбин.

Объектом исследования являются РЛ 1 ступени турбины высокого давления (ВД) газогенератора серийных одноконтурных двухвальных газотурбинных наземных установок НК-16-18СТ для газоперекачивающего агрегата (ГПА), разработанных на основе конвертированных авиационных двигателей семейства НК-8-2У конструкции Н.Д. Кузнецова.

Рабочая лопатка 1 ступени турбины ВД газогенератора является наиболее нагруженной РЛ двигателя НК-16-18СТ, т.к. работает в условиях максимальной частоты вращения ротора и при максимальной температуре. Материал лопатки – литейный сплав ЖС6У-ВИ равноосной структуры.

Расчёт статической прочности РЛ проведён по теории стержней с начальной закруткой на ресурс 200000 часов со 100% его использованием за ресурс. Аппроксимация свойств длительной прочности материала лопаток проведена с использованием параметра Ларсона-Миллера.

Соответствие результатов расчётного исследования НДС рабочих лопаток их реальной нагруженности подтверждается данными металлургического исследования лопаток после длительной эксплуатации [1, 2].

Учитывая значительные ресурсы наземных двигателей и многократное восстановление параметров работы двигателей, можно считать, что суммарная наработка не оказывает влияния

на параметры работы двигателя и, следовательно, нагруженность деталей двигателя остаётся близкой к исходному уровню, в отличие от авиационных двигателей.

С учётом того, что наземная ГТУ НК-16-18СТ эксплуатируется в различных климатических зонах, в интервале температур атмосферного воздуха от -50°C до $+45^{\circ}\text{C}$, для получения информации о нагруженности рабочих лопаток и её статистических характеристиках были построены необходимые приближённые зависимости и для 100 значений условий эксплуатации вычислены 100 значений действующих в лопатках напряжений. Затем эта выборка в 100 значений была подвергнута статистической обработке в соответствии с рекомендациями [3] с использованием программы excel.

Результаты проверки гипотезы о нормальности закона распределения величины $lg\sigma_{\Sigma Л}$ с использованием критерия согласия Пирсона (χ^2) позволяют сделать вывод о том, что закон распределения величины $lg\sigma_{\Sigma Л}$ является нормальным при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [4].

Для длительного статического нагружения, характерного для РЛ турбин, И.А. Биргером [4] был предложен двумерный вероятностный критерий разрушения:

$$P_{\text{разр}} = \text{ver}(\sigma_r < \sigma_q, \tau_r < \tau_q), \quad (1)$$

где $\sigma_r = \sigma_{\text{дл}}$ – предел длительной прочности материала лопаток; $\sigma_q = \sigma_{\Sigma Л}$ – эквивалентное действующее напряжение в опасном сечении лопатки при работе двигателя на наиболее тяжёлом режиме; $\tau_r = \tau_p$ – время до разрушения материала лопатки при работе двигателя на наиболее тяжёлом режиме; τ_q – время работы лопатки на указанном выше режиме.

Преобразуем выражение (1) к виду:

$$P_{\text{разр}} = \text{ver}(\sigma_r/\sigma_q < 1, \tau_r/\tau_q < 1) = \text{ver}(K_M^* < 1, K_T^* < 1), \quad (2)$$

где K_M^* и K_T^* – статистические запасы прочности и долговечности, вычисленные по статистически экстремальным значениям параметров.

Для рабочих лопаток турбин выражения для статистических запасов прочности и долговечности представляют собой функции от толерантных коэффициентов K_{S1}, \dots, K_{S4} [5], выбранных уровней значимости α и доверительной вероятности P_d , а также объёма выборок n_1, \dots, n_4 и искомого значения долговечности τ_3 .

Тогда условия разрушения в соответствии с критериями (1) и (2) представимы в виде:

$$K_M^* = \varphi_1(\alpha, P_d, n_1, n_2, \tau_3) = 1; \quad (3)$$

$$K_T^* = \varphi_2(\alpha, P_d, n_3, n_4, \tau_3) = 1. \quad (4)$$

Из решения уравнений (3) и (4) относительно τ_3 получаем два значения долговечности в часах, из которых берём минимальное значение.

Предложенный метод прогнозирования долговечности деталей турбин по параметру длительной прочности на основе вероятностного подхода позволяет определять долговечность рабочих лопаток турбин авиационных двигателей и газогенератора наземной ГТУ для ГПА при любом уровне эксплуатационной наработки. Метод применим для оценки индивидуального ресурса при эксплуатации по техническому состоянию.

Список литературы

1. Протасова Н.А. Влияние эксплуатационной наработки на свойства и микроструктуру рабочих лопаток турбины двигателей ГПА / Н.А. Протасова, Н.П. Великанова, П.Г. Великанов, А.А. Ахмадеев // Насосы. Турбины. Системы. 2019. № 1 (30). С. 18-25.
2. Протасова Н.А. Эксплуатационные закономерности расходования прочностных характеристик материала турбинных лопаток двигателей ГПА / Н.А. Протасова, Н.П. Великанова, П.Г. Великанов, А.А. Ахмадеев // Авиационные двигатели. 2019. № 2 (3). С. 39-48.
3. Великанова Н.П. Анализ статистической нагруженности рабочих лопаток турбин авиационных ГТД большого ресурса на основе вероятностного подхода / Н.П. Великанова, А.С. Киселев // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 9 (76). С. 112-115.

4. Биргер И.А. Вероятность разрушения и запасы прочности при многомерных критериях разрушения // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении: Сб. статей. 1985. Вып. 3. С. 7-22 (Труды ЦИАМ: № 1109).

5. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. 416 с.

Сведения об авторах

Великанова Нина Петровна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: прогнозирование долговечности основных деталей газотурбинных двигателей с использованием статистического анализа и вероятностных критериев разрушения.

Протасова Надежда Анатольевна, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по науке ООО «АХТЗ». Область научных интересов: влияние эксплуатационной наработки на свойства и микроструктуру основных деталей газотурбинных двигателей.

Великанов Петр Геннадьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: прогнозирование долговечности основных деталей газотурбинных двигателей с использованием статистического анализа и вероятностных критериев разрушения.

PREDICTING THE DURABILITY OF THE TURBINE BLADES OF A GROUND-BASED GAS GENERATOR TURBINE FOR A GPU BASED ON A PROBABILISTIC APPROACH

Velikanova N.P.¹, Protasova N.A.², Velikanov P.G.¹

¹Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI), Kazan, Russia, ivanov@mail.ru

²Limited Liability Company «AtomChemTechZashchita», Kazan, Russia, nprotasova@bk.ru

Keywords: working blade, durability, resource, statistical analysis, probabilistic criterion of destruction

The method is based on the analysis of the stress-strain state of the turbine blades and its changes during long-term operation in accordance with the characteristics of the ground-based gas turbine units for the GPU.

In addition, the paper examines statistical data on the mechanical characteristics and durability of the material of the turbine blades—a heat-resistant ZhS6U-VI alloy on a nickel base. Changes in the characteristics of the material during long-term operation are taken into account.

The durability of the turbine blades is predicted based on changes in the statistical safety margins during operation. The object of the study is the working blades of the gas generator turbine of the NK-16-18ST ground installation, which is currently widely used and has an established assigned resource of up to 150,000 hours.