

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН ДВИГАТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА НК С УЧЁТОМ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

Великанова Н.П.¹, Великанов П.Г.^{1,2}, Протасова Н.А.³

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

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, pvelikanov@mail.ru

³ООО «АХТЗ», г. Казань, nprotasova@bk.ru

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

Рабочие лопатки (РЛ) турбин (как авиационных, так и наземных) газотурбинных двигателей (ГТД) 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 для деталей 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. Приведенные аргументы определяют необходимость применения методов теории вероятности и математической статистики для оценки и прогнозирования долговечности ответственных деталей, какими являются РЛ турбин.

Объектом исследования являются РЛ первой ступени турбины высокого давления (ВД) газогенераторов серийных авиационных ГТД и газотурбинных наземных установок (ГТУ) для газоперекачивающих агрегатов (ГПА), разработанных на основе конвертированных авиационных двигателей семейства НК-8-2У конструкции Н.Д. Кузнецова.

Рабочие лопатки первой ступени турбины ВД газогенераторов всех исследуемых двигателей являются наиболее нагруженными РЛ двигателей, так как работают в условиях максимальной частоты вращения ротора и при максимальной температуре. Материал лопаток – жаропрочные сплавы ЖС6У-ВИ и ЖС30-ВИ на никелевой основе (равноосной и монокристаллической структуры, соответственно).

Расчёт статической прочности РЛ проведен по теории стержней переменного поперечного сечения с начальной закруткой и с помощью метода конечных элементов в программе Ansys. Аппроксимация свойств длительной прочности материала РЛ проведена с использованием формулы Ларсона-Миллера.

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

В отличие от авиационных ГТД, учитывая значительные ресурсы наземных ГТУ для ГПА и многократное восстановление их параметров работы, можно считать, что суммарная

наработка наземных ГТУ для ГПА не оказывает влияния на параметры работы двигателя и, следовательно, нагруженность деталей двигателя остается близкой к их исходному уровню.

Для получения информации о нагруженности РЛ всех исследуемых двигателей и их статистических характеристик были построены необходимые приближённые зависимости и для 100 значений условий эксплуатации вычислены 100 значений действующих в РЛ напряжений. Затем эта выборка для каждого двигателя 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 РЛ 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 для каждого двигателя по два значения долговечности в часах для каждой РЛ первой ступени турбины ВД, из которых берём минимальные значения.

Предложенный метод прогнозирования долговечности деталей турбин по параметру длительной прочности на основе вероятностного подхода позволяет определять долговечность РЛ 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., Великанова Н.П., Великанов П.Г., Ахмадеев А.А. Влияние эксплуатационной наработки на свойства и микроструктуру рабочих лопаток турбины двигателей ГПА / Насосы. Турбины. Системы. Воронеж, 2019. № 1 (30). С. 18-25.

2. Протасова Н.А., Великанова Н.П., Великанов П.Г., Ахмадеев А.А. Эксплуатационные закономерности расходования прочностных характеристик материала турбинных лопаток двигателей ГПА / Авиационные двигатели. М., 2019. № 2 (3). С. 39-48.

3. Великанова Н.П., Киселев А.С. Анализ статистической нагруженности рабочих лопаток турбин авиационных ГТД большого ресурса на основе вероятностного подхода / Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, 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. М., 1985. Вып. 3. С. 7-22 (Труды ЦИАМ: № 1109).

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

Сведения об авторах

Великанова Нина Петровна, д.т.н., профессор кафедры реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: прогнозирование долговечности основных деталей газотурбинных двигателей с использованием статистического анализа и вероятностных критериев разрушения.

Великанов Петр Геннадьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ-КАИ, доцент кафедры теоретической механики КФУ. Область научных интересов: прогнозирование долговечности основных деталей газотурбинных двигателей с использованием статистического анализа и вероятностных критериев разрушения.

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

FORECASTING THE DURABILITY OF NK FAMILY ENGINES TURBINE BLADES TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS FACTORS BASED ON A PROBABILISTIC APPROACH

Velikanova N.P.¹, Velikanov P.G.^{1,2}, Protasova N.A.³

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

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia, pvelikanov@mail.ru

³Limited 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 working blades (WB) of the first stage of a high-pressure (HP) turbine and its changes during long-term operation in accordance with the characteristics of aviation gas turbine engines (GTE) and ground-based gas turbine engines (GTE) for gas pumping aggregate (GPA).

In addition, the article discusses statistical data on the mechanical characteristics and durability of turbine blades materials – heat-resistant alloys ZhS6U-VI and ZHS30-VI on a nickel basis (equiaxed and single-crystal structure, respectively). 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 margin of safety during operation.

The object of the study is the WB of the first stage of the HP turbine of gas generators of serial aviation GTE and ground-based GTE for GPA developed on the basis of converted aircraft engines of the NK-8-2U family designed by N.D. Kuznetsov.