

ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ НИТРИДА ТИТАНА НА СВОЙСТВА УСТАЛОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Приведены результаты исследования влияния эрозионностойкого покрытия нитрида титана на свойства усталости рабочих лопаток компрессора. Определены пределы выносливости новых лопаток с покрытием и лопаток с эрозионным износом от наработки с покрытием и без покрытия для вероятности неразрушения $P=0,9$.

Ключевые слова: испытания на усталость, рабочая лопатка компрессора, покрытие нитрида титана, эрозионный износ, напряжение, предел выносливости.

Введение

Газотурбинные двигатели во время работы вертолета постоянно подвергаются воздействию взвешенных частиц, таких как пыль, песок, вулканический пепел, находящихся в воздухе, которые вызывают эрозию. Это воздействие усиливается во время взлета и посадки, особенно на неподготовленных площадках или во время работы в пустыне. Особенно вредна эрозия для компрессора двигателя, что влечет за собой снижение КПД и помпаж, уменьшается срок службы, повышается расход топлива и снижаются показатели надежности двигателей. Эрозионный износ лопаток компрессора приводит к снижению их сопротивления усталости и до 60 % поломок лопаток компрессоров ГТД носят характер усталости [1].

Учитывая актуальность проблемы, были проведены исследования, в задачу которых входило определение влияния эрозионностойкого покрытия нитрида титана на свойства усталости рабочих лопаток компрессора двигателя Д-136.

Испытания на усталость проводились на новых лопатках с покрытием и на лопатках с покрытием и без покрытия с эрозионным износом пера, прошедших испытания в составе двигателя с вбрасыванием пыли в тракт. Вбрасывание пыли в тракт двигателя производилось при его работе на стенде в течение 7 циклов. Общая масса пыли составила 57,2 кг.

Нанесение покрытия нитрида титана осуществлялось методом вакуумной ионно-плазменной технологии, в среде реактивного газа посредством катодного пятна вакуумной дуги с последующей конденсацией потоков газометаллической плазмы на обрабатываемую поверхность.

Испытания на усталость проводились на рабочих лопатках различных ступеней компрессора. Данные по рабочим лопаткам приведены в таблице 1. Лопатки 1 ступени КВД с эрозионным износом (с покрытием и без покрытия) не испытывались.

Для контроля уровня динамических напряжений при испытаниях на усталость лопатки были препариро-

ваны проволочными тензорезисторами базой 5 мм согласно схеме, приведенной на рисунке 1. Размеры расположения контрольного тензорезистора представлены в таблице 2.

Испытания на усталость лопаток проводились при изгибных колебаниях по основному тону (первая изгибная форма) с симметричным циклом нагружения в условиях комнатной температуры по методу ступенчатого изменения напряжений (метод «лестницы»).

Базовое число циклов нагружения составляло:

- для титановых лопаток – $N = 10^8$ циклов;
- для стальных лопаток – $N = 2 \cdot 10^7$ циклов.

Таблица 1 – Материал лопаток исследуемых ступеней компрессора

Ступень компрессора	Материал лопатки	σ_{-1} , кгс/мм ²
6 ступень КНД	BT3-1	≥ 40
1 ступень КВД	BT8	
5 ступень КВД	BT8	
7 ступень КВД	XH77ПОР	≥ 31

Таблица 2 – Размеры для препарирования контрольного тензорезистора

Ступень компрессора	А, мм	Б, мм
6 ступень КНД	9	41
1 ступень КВД	9	39,5
5 ступень КВД	7,5	19
7 ступень КВД	6,5	16

Начальный уровень нагружения избирался для каждой ступени отдельно, исходя из свойств на усталость. Параметры нагружения и результаты испытаний на примере лопаток 6 ступени КНД представлены в таблице 3;

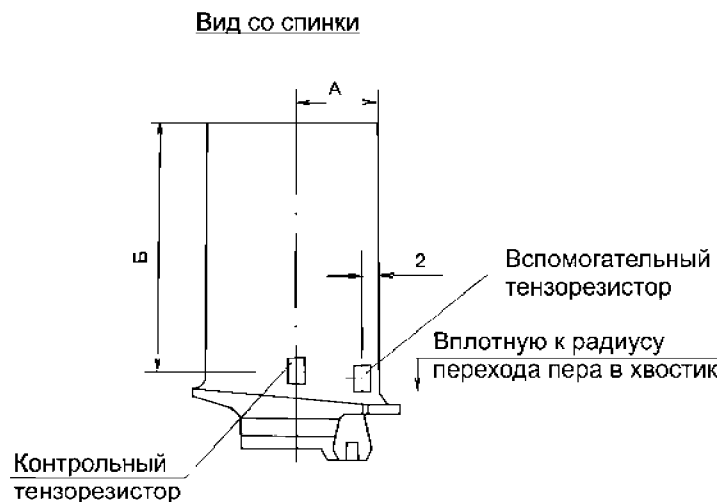


Рис. 1. Схема препарировки лопаток для испытаний на усталость

диаграммы на усталость «лестница», отражающие картину испытаний, приведены на рисунке 2.

Обработка результатов испытаний и вычисление значений среднего предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1}i$ и его среднеквадратического отклонения $S_{\sigma_{-1}}i$ произведены по формулам:

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + d \left(\frac{A}{R} - 0,5 \right), \quad (1)$$

$$S_{\sigma_{-1}}i = 1,62 \cdot d \cdot \left(\frac{R \cdot B - A^2}{R^2} + 0,029 \right), \quad (2)$$

где σ_0 – нижний уровень нагружения в диаграмме на усталость, на котором нет разрушений;

R – общее количество разрушений лопаток в партии $R = \sum_{i=0}^{i=n} r_i$;

$$A = \sum_{i=0}^{i=n} r_i \cdot i; \quad B = \sum_{i=0}^{i=n} r_i \cdot i^2;$$

r_i – количество разрушений на i -м уровне нагружения;

i – номер уровня ($i = 0; 1; 2 \dots n$);

d – степень изменения напряжений между уровнями нагружения.

Пределы выносливости, полученные при испытаниях исследуемых лопаток для вероятности неразрушения $P = 0,5$, были пересчитаны на вероятность неразрушения $P = 0,9$ по формуле:

$$\sigma_{-1(P=0,9)} = \bar{\sigma}_{-1(P=0,5)} - z_{P1} \cdot S_{\sigma_{-1}}, \quad (3)$$

где z_{P1} – квантиль нормального вероятностного распределения для $P = 0,9$; $z_{P1} = 1,2815$.

Результаты математической обработки результатов настоящих испытаний для лопаток 6 ступени КНД приведены на рисунке 2.

Анализ результатов испытаний новых лопаток всех исследованных ступеней показывает, что нанесение данного покрытия практически не влияет на их свойства усталости, так как полученные пределы выносливости не ниже требуемых значений.

Значения пределов выносливости новых лопаток с покрытием и лопаток с эрозионным износом отработки с покрытием и без покрытия для вероятности неразрушения $P = 0,9$ по результатам испытаний приведены в таблице 4.

Анализ результатов испытаний лопаток с эрозионным износом показывает, что данное покрытие не снижает свойства усталости пера лопаток по сравнению с лопатками без покрытия.

Снижение свойств усталости лопаток 7 ступени КВД с эрозионным износом ниже требуемых значений, что объясняется значительной чувствительностью материала лопаток к концентрации напряжений (чувствительность к надрезу), т. е. является следствием появления на пере лопаток в результате износа от испытаний множества рисков-концентраторов.

Определение чувствительности к надрезу, проведенное на круглых штампованных образцах гладких и с надрезом (радиус надреза $r_n = 0,75$ мм), показало при базе испытаний $N = 2 \cdot 10^7$ циклов следующие пределы выносливости:

- σ_{-1} (гладких) = 34 кгс/мм²;
- σ_{-1} (надрез) = 20 кгс/мм².

При теоретическом коэффициенте концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 1,89$ эффективный коэффициент концентрации напряжений составил $K_\sigma = 1,7$ и коэффициент чувствительности к надрезу $q = 0,785$, что подтверждает высокую чувствительность материала ХН77ТЮР (лопатки 7 ступени КВД) к концентрации напряжений [2].

Для выявления возможного из-за изменения геометрии пера лопаток от эрозионного износа перераспре-

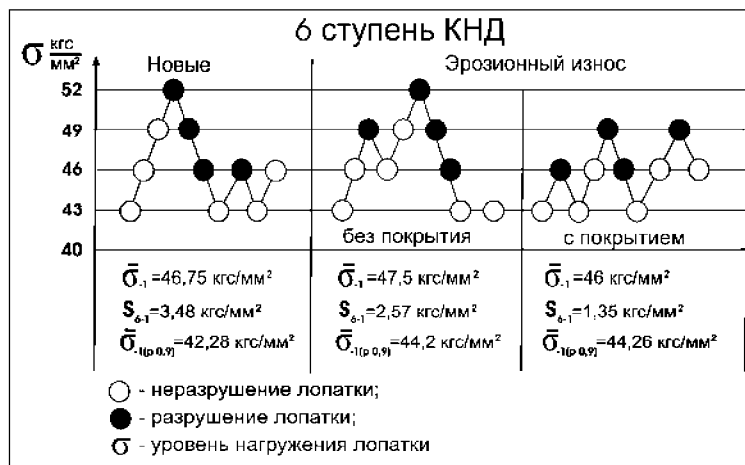


Рис. 2. Диаграммы «лестница» по результатам испытаний на усталость лопаток 6 ступени КНД

Таблица 4 – Пределы выносливости исследуемых лопаток

Ступень компрессора	Пределы выносливости лопаток σ_{-1} , кгс/мм ²		
	новых с покрытием	с покрытием и эрозионным износом от наработки	без покрытия и эрозионным износом от наработки
6 ступень КНД	42,28	44,26	44,2
1 ступень КВД	42,72	—	—
5 ступень КВД	41,26	42,28	42,9
7 ступень КВД	36,4	25,92	16,6

деления напряжений от места, где они задаются и контролируются к месту разрушения лопаток (радиус перехода пера в хвостовик), было проведено исследование распределения напряжений на лопатках 7 ступени КВД при помощи тензорезисторов с базой 1 мм (рис. 3).

Исследование распределения напряжений на лопатках новых и с эрозионным износом не выявило перераспределения напряжений, могущих повлиять на точность задания напряжений, что подтверждает снижение свойств усталости от влияния концентрации напряжений.

Общий анализ результатов испытаний показывает, что нанесение на перо лопаток покрытия нитрида титана не ухудшает их свойств усталости, определенных при испытании по первой изгибной форме колебаний.

Выводы

1. Нанесение эрозионостойкого покрытия нитрида титана на перо лопаток 6 ступени КНД, 1, 5, 7 ступеней КВД двигателя Д-136 не ухудшает свойств усталости новых лопаток. Пределы выносливости лопаток данных ступеней, определенные при испытаниях по первой изгибной форме колебаний, соответствуют требованиям.

2. Испытания на усталость лопаток с покрытием нитрида титана и эрозионным износом пера в результате вброса пыли в тракт двигателя Д-136 при его работе на стенде показали защитную роль покрытия.

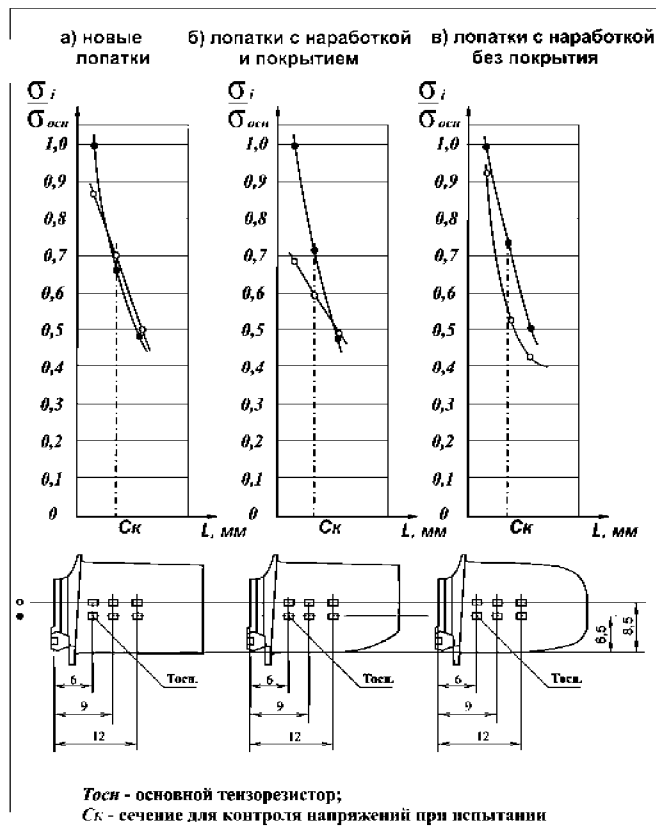


Рис. 3. Распределение напряжений для лопаток 7 ступени КВД новых и с наработкой

Список литературы

1. Иноземцев А. А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок : учебник / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. – М. : Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с.
2. Масленков С. Б. Жаропрочные стали и сплавы. Справочник / С. Б. Масленков – М. : Металлургия, 1983. – 192 с.

Одержано 12.03.2013

Бабенко О.М. Вплив покриття нітриду титану на властивості втомних робочих лопаток компресора

Представлено результати досліджень впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на властивості втомних робочих лопаток компресора. Визначені границі витривалості нових лопаток з покриттям та лопаток з ерозійним зношуванням від напруження з покриттям та без покриття для ймовірності неруйнування $P = 0,9$.

Ключові слова: випробування на втому, робоча лопатка компресора, покриття нітриду титану, ерозійне зношування, напруження, границя витривалості.

The erosion-proof coating of titanium nitride on compressor working blades fatigue properties were researched. The endurance limits of new blades with coating and blades with an erosive wear after operating with and without coating for probability of non-destruction $P = 0,9$ were determined.

Key words: fatigue tests, compressor working blade, titanium nitride coating, erosive wear, tension, endurance limit.
