

УДК 620.198:621438

**В. С. Ефанов¹, канд. техн. наук А. Н. Прокопенко¹,
д-р тех. наук А. В. Овчинников², д-р тех. наук Ю. Н. Внуков²**

¹АО «Мотор Сич», ²Запорожский национальный технический университет; г. Запорожье

ЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНЫХ ГТД С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПОКРЫТИЙ

Приведены результаты сравнительных стендовых испытаний двигателя ТВ3-117ВМА с установкой компрессора, укомплектованного рабочими лопатками с 16 вариантами покрытий. Проведена оценка эрозионной стойкости лопаток компрессора от состава покрытия и технологии его нанесения.

Ключевые слова: покрытие, компрессор, лопатка рабочая, эрозионная стойкость, износ, ГТД, газоабразивный, статистика, наработка, испытание.

Введение

Решением проблемы повышения эрозионной стойкости лопаток компрессора вертолетных ГТД (газотурбинный двигатель), эксплуатируемых в условиях повышенной запыленности атмосферы, на предприятии АО «Мотор Сич» интенсивно начали заниматься в начале 1980-х. В период 1989–1990 гг. были проведены стендовые сравнительные эрозионные испытания лопаток компрессора, а также получена первая информация о работоспособности лопаток с покрытием нитрид титана (TiN) в реальных условиях эксплуатации, в районах с повышенной запыленностью атмосферы. Проведенные работы показали, что покрытие из нитрида титана является эффективным средством защиты лопаток компрессора вертолетных ГТД от пылевой эрозии [1].

На данный момент, предприятие располагает технологией и оборудованием собственной разработки для нанесения эрозионностойкого покрытия нитрида титана методом вакуумной ионно-плазменной технологии.

Тем не менее, за прошедший период времени в различных организациях разработаны новые

типы покрытий, в том числе многокомпонентные с экстремальными свойствами.

Цель работы. Проведение сравнительных эрозионных испытаний для определения более эффективных типов покрытий по сравнению с применяемым на предприятии нитридом титана.

Условия проведения испытаний

Сравнительные стендовые испытания предусматривали подготовку полноразмерного двигателя ТВ3-117ВМА с установкой компрессора, укомплектованного рабочими лопатками с 16 вариантами различных покрытий, приведенных в таблице 1.

Согласно программе, согласованной с ЦИАМ, сравнительные эрозионные испытания были проведены в 4 этапа с общей наработкой двигателя ~ 6 часов, расход абразива составил ~ 16 кг.

В качестве абразивного материала использовался кварц молотый пылевидный КП-2 марки Б с грануляцией помола 0,020 мм, таким образом при сравнительных эрозионных испытаниях были воспроизведены условия работы двигателя с ПЗУ (пылезащитное устройство), т. к. в ПЗУ грибкового типа не подлежит сепарации фракция песка $\leq 0,02$ мм.

Таблица 1 – Варианты защитных покрытий

№	Покрытие	№	Покрытие	№	Покрытие	№	Покрытие
1	TiCrN (№1)	5	TiAlYN	9	TiC	13	TiN - многослойное
2	CoTiC	6	TiZrN (№2)	10	MoN	14	TiZrN (№1)
3	CoTiN	7	TiN (№1)	11	TiAlN	15	TiN (C) - серийное
4	TiCrN (№2)	8	TiAlN	12	TiN (№2)	16	Без покрытия

Примечание. №2 — отмечены покрытия от различных производителей.

Схема подачи абразива на вход двигателя приведена на рис. 1, кварцевый песок подавался во входное устройство 3 двигателя посредством порошкового дозатора 2, управляемого дистанционно при помощи пульта 1.

Дозатор располагался вне зоны воздушного потока, абразив подавался во входное устройство посредством трубки 4, срез которой находился на расстоянии 1 м от входного устройства и высоте 0,5 м выше оси вращения ротора, что обеспечило более равномерное распределение абразива по потоку.

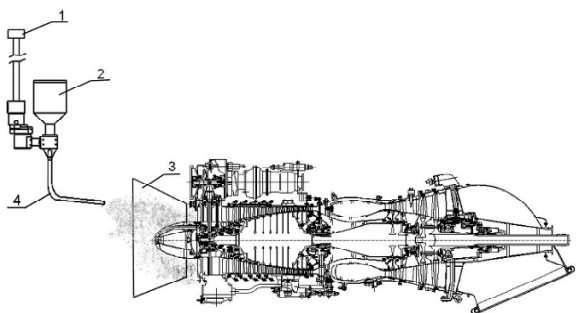


Рис. 1. Схема подачи абразива при эрозионных испытаниях: 1 – пульт управления, 2 – дозатор, 3 – входное устройство, 4 – подающая трубка

Оценка состояния лопаток после эрозионных испытаний

Из опыта эксплуатации и ранее проведенных испытаний установлено, что максимальный эрозионный износ наблюдается в периферийной части лопаток из-за сепарации абразивных частиц и более высоких скоростей набегания газоабразивного потока на поверхность лопатки.

Механизм износа лопаток без покрытия следующий: по мере воздействия газоабразивного потока на входную кромку и поверхность пера со стороны корыта происходит износ входной кромки в периферийной части и утонение профиля за счет уноса материала лопатки абразив-

ными частицами, как следствие, интенсивный износ выходной кромки.

Наличие покрытия с высокой твердостью на поверхности корыта препятствует износу лопатки, поэтому одним из критериев работоспособности покрытия является его наличие на профиле пера лопатки со стороны корыта в периферийной части в процессе эксплуатации. Учитывая относительно малые толщины покрытия (~ 6...10 мкм), наличие покрытия на проточной поверхности свидетельствует также о сохранении геометрических параметров профиля пера лопатки.

Визуальная оценка состояния лопаток после эрозионных испытаний показала, что все типы испытанных покрытий на входной кромке подвержены износу, по корыту и выходной кромке состояние покрытия для каждого типа различное. В итоге, определяющим параметром, характеризующим эрозионный износ лопаток с покрытием является изменение размера хорды в периферийном сечении до и после испытаний. На рис. 2 приведены относительные изменения хорд лопаток 6-й ступени в периферийном сечении с различными типами покрытий:

$$\Delta = (L_1 - L_2)/L_1 \cdot 100 \%,$$

где Δ – относительное изменение хорды лопатки в периферийном сечении, %;

L_1 – размер хорды до испытаний, мм;

L_2 – размер хорды после испытаний, мм.

Из результатов измерений хорд следует, что целый ряд покрытий независимо от состава способны противостоять эрозионному износу, в том числе и покрытия на основе нитрида титана. На лопатках с относительным эрозионным износом менее 10 % уменьшение размера хорд происходит вследствие износа входной кромки, более 10 % уже наблюдается износ выходной кромки в результате отслоения (повреждения) покрытия в периферийной части лопатки со стороны корыта.

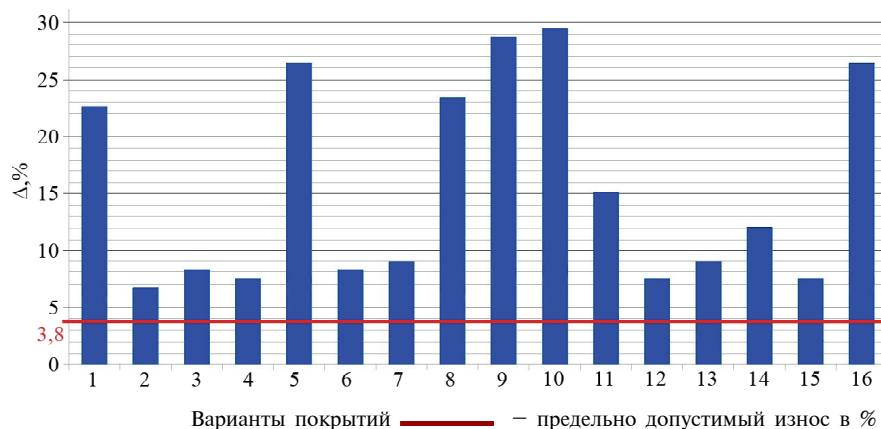


Рис. 2. Относительный эрозионный износ хорды лопаток 6 ст. в периферийном сечении

Степень повреждения покрытий после эрозионных испытаний различна, наряду с лопатками, где состояние покрытия удовлетворительное, выявлены лопатки, состояние покрытия которых существенно отличается даже в пределах партии деталей одного изготовителя, что по-видимому, обусловлено недостаточной стабильностью технологического процесса нанесения покрытия.

Из приведенных значений можно сделать вывод, что целый ряд покрытий (CoTiC, TiCrN, TiN) повышает сопротивляемость эрозионному износу в 1,5...3,5 раз.

На рис. 3 приведены снимки лопаток 6-й ступени с различными вариантами покрытий прошедших испытания, тонкими линиями нанесены контуры лопаток до эрозионных испытаний.

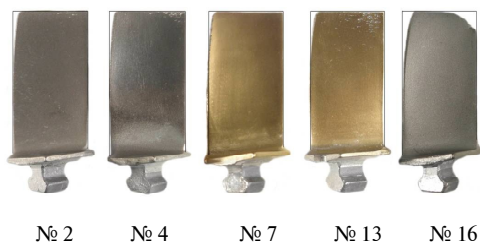


Рис. 3. Лопатки 6 ст., прошедшие эрозионные испытания

Данные лопатки подбирались по принципу минимального повреждения покрытия, относительный эрозионный износ хорд этих лопаток с покрытием соизмерим и находится в пределах погрешности измерений.

На приведенных лопатках относительный износ обусловлен износом входных кромок, где угол набегания газообразного потока на поверхность лопатки составляет $\sim 90^\circ$, в тоже время все покрытия удовлетворительно отработали при малых углах набегания потока, что имеет место по корыту лопатки. На том же рисунке для сравнения показана лопатка без покрытия (№ 16), опыт эксплуатации показывает, что такая степень износа приводит к отказу двигателя, который квалифицируется как помпаж.

Следует также отметить лопатки (см. рис. 4) с более существенными повреждениями, но тем не менее на протяжении всего цикла эрозионных испытаний наличие покрытия на этих лопатках существенно замедлило износ по хорде в периферийном сечении.

На рис. 5 приведены фотографии лопаток с покрытиями, которые неудовлетворительно отработали в условиях эрозионных испытаний.

Анализируя состояние покрытий на лопатках можно сделать вывод, что неудовлетворительная работоспособность лопаток связана прежде всего с технологией нанесения и ее низкой стабильностью.

Таким образом, эрозионная стойкость в меньшей степени зависит от состава покрытий, и по-



Рис. 4. Лопатки 6 ст., прошедшие эрозионные испытания

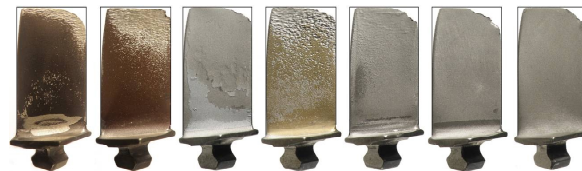


Рис. 5. Лопатки 6 ст., неудовлетворительно прошедшие эрозионные испытания

видимому, обусловлена механическими свойствами и состоянием покрытия, в частности наличием капельной фазы, ее количества и размеров. Капельная фаза не обладает экстремальными свойствами покрытия и является очагом разрушения при воздействии газообразного потока на поверхность лопатки.

Выводы

1. В результате проведенных сравнительных эрозионных испытаний 16 различных эрозионно-стойких покрытий установлено, что несколько типов покрытий (CoTiC; TiCrN; TiN - многослойное), в том числе использованные на предприятии АО «Мотор Сич» покрытие из нитрида титана (TiN - серийное), в равной степени могут быть использованы для защиты от пылевой эрозии лопаток компрессора вертолетных ГТД.

2. Установлено, что лопатки с покрытием TiZrN; CoTiN имеют более существенные повреждения, однако, на протяжении всего цикла эрозионных испытаний существенно замедлили износ по хорде в периферийном сечении.

3. Для повышения эксплуатационных свойств помимо состава покрытия, определяющую роль играет технология нанесения. Необходимо провести в дальнейшем работы по совершенствованию технологического процесса и оборудования получения покрытия из нитрида титана.

Список литературы

1. Повышение эрозионной стойкости рабочих лопаток компрессора ГТД / [Н. В. Белан, В. В. Омельченко, А. Н. Прокопенко и др.] // *Авиационная промышленность*. — 1986. — № 10. — С. 19–20.

Поступила в редакцию 15.05.2017

Єфанов В.С., Прокопенко О.М., Овчинніков О.В., Внуков Ю.М. Ерозійна стійкість лопаток компресора вертолітного ГТД з різними типами покриттів

Наведено результати порівняльних стендових випробувань двигуна ТВ3-117ВМА з установкою компресора, укомплектованого робочими лопатками з 16 варіантами покриттів. Проведено оцінку ерозійної стійкості лопаток компресора від складу покриття і технології його нанесення.

Ключові слова: покриття, компресор, лопатка робоча, ерозійна стійкість, знос, ГТД, газоабразивний, статистика, напрацювання, випробування.

Yefanov V., Prokopenko O., Ovchinnikov O., Vnukov Yu. Erosion resistance of helicopter GTE compressor blades protected by various types of coatings

This work presents the results of comparative bench tests conducted for TV3-117VMA engine with a compressor equipped with rotor blades protected by 16 types of coatings. Impact assessment of coating composition and coating method on compressor blade erosion resistance was made.

Key words: coating, compressor, rotor blade, erosion resistance, wear, GTE, gas-abrasive, statistics, operating time, test.