

Литература

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
2. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1972. – 220 с.
3. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 140 с.
4. Халатов А.А., Онищенко В.Н., Доник Т.В и др. Фактор аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различного типа // Известия Российской академии наук. Сер. Энергетика. – 2011, №4 – С. 109-116.
5. Доник Т.В., Халатов А.А. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубе с крестообразной вставкой и частичной закруткой потока // Промышленная теплотехника. – 2012, №2 – С. 28-32.
6. Khalatov A., Syred N., Bowen P., et al. Innovative Cyclone Cooling Scheme for Gas Turbine Blade: Thermal-Hydraulic Performance Evaluation // ASME Paper №GT2000-237. – 2000.
7. Кикнадзе Г.И., Гаччиладзе И.А., Алексеев В.В. Самообразование смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 83 с.
8. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / Халатов А.А., Романов В.В., Борисов И.И. и др. – К.: Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2010. – Том 9. – 317 с. – (Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин).

□ □
Наведено результати відновлення зношених деталей компресора авіаційних газотурбінних двигунів після закінчення міжремонтного ресурсу

Ключові слова: геотермічні покриття, відновлення деталей

□ □
Приведены результаты восстановления изношенных деталей компрессора авиационных газотурбинных двигателей по истечении межремонтного ресурса

Ключевые слова: газотермические покрытия, восстановление деталей

□ □
Given the results of gas-turbine engine compressor parts restoration process after expiration of the TBO resource

Key words: thermal barrier coatings, parts restoration

□ □

УДК 621.793.7

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. И. Долматов

Доктор технических наук, профессор*

Контактный тел.: (057) 788-42-04

С. В. Сергеев

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: 050-300-36-36

E-mail: sergeyev72@gmail.com

И. В. Зорик

Старший преподаватель*

Контактный тел.: 095-345-13-11

E-mail: igor@d2.khai.edu

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»
ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070

Введение

К современным авиационным ГТД предъявляются высокие требования по увеличению ресурса, повышению надежности, снижению удельного веса, что обуславливает применение дорогостоящих и труднообрабатываемых материалов: алюминиевых и магниевых сплавов, высокопрочных легированных сталей, жаростойких хромоникелевых сплавов, композиционных материалов, что существенно сказывается на

себестоимости изделий. Для повышения конкурентоспособности изделия в целом необходимо снизить себестоимость этапов жизненного цикла: проектирования, производства, эксплуатации и ремонта. Повышение уровня эксплуатационных свойств наиболее нагруженных деталей авиационных двигателей возможно с использованием нескольких подходов: разработка новых материалов, совершенствование способов изготовления и применение новых технологических процессов, а также развитие способов

поверхностного упрочнения деталей и применения различных защитных покрытий.

Лопатки компрессора являются наиболее массовой деталью, а также непосредственно влияют на устойчивость работы двигателя и его качество, как изделия, что определяет повышенное внимание на всех этапах жизненного цикла.

Анализ предыдущих исследований

В процессе эксплуатации можно выделить следующие, наиболее характерные виды износа [1,2]:

- эрозийный – наиболее выражен у вертолетных ГТД, большие окружные скорости обуславливают применение лопаток со сверхзвуковым профилем компрессорных решеток с тонкими входными и выходными кромками, что крайне неблагоприятно сказывается на долговечности;

- фреттинг-коррозия замковой части лопаток – при циклическом нагружении в зоне контакта образуются ювенильные поверхности, формирующие зоны фреттинг-коррозии, которые в свою очередь могут являться очагами зарождения усталостных трещин;

- механические повреждения – попадание инородных предметов, приводит к пластической деформации, появлению забоин, изменению геометрии входной кромки, повышению концентрации напряжений;

- механический – наблюдается на периферийной части лопаток ГТД, вследствие больших динамических нагрузок при посадке ЛА происходит соприкосновение периферии лопатки со статором компрессора, что приводит к появлению выработки и увеличению радиального зазора.

В настоящее время широко и достаточно успешно применяются на различных стадиях производственного процесса методы защиты и упрочнения поверхностного слоя компрессорных лопаток ГТД[3,4]: механические и комбинированные методы ППД; по-

крытия основанные на методах химического осаждения (Chemical Vapour Deposition – CVD), методах физического осаждения (Physical Vapour Deposition – PVD), а также разнообразные газотермические покрытия.

При восстановлении деталей, подвергающимся размерному износу в процессе эксплуатации, применение методов CVD и PVD-покрытий во многих случаях нецелесообразно, а в некоторых невозможно, т.к. величина износа может быть весьма существенна и достигать значений более 500мкм.

Современные методы ГТН покрытий позволяют получать различные виды покрытий с высокими характеристиками износостойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости, однако одной из главной составляющей эксплуатационной характеристики покрытия является адгезионная и когезионная прочность.

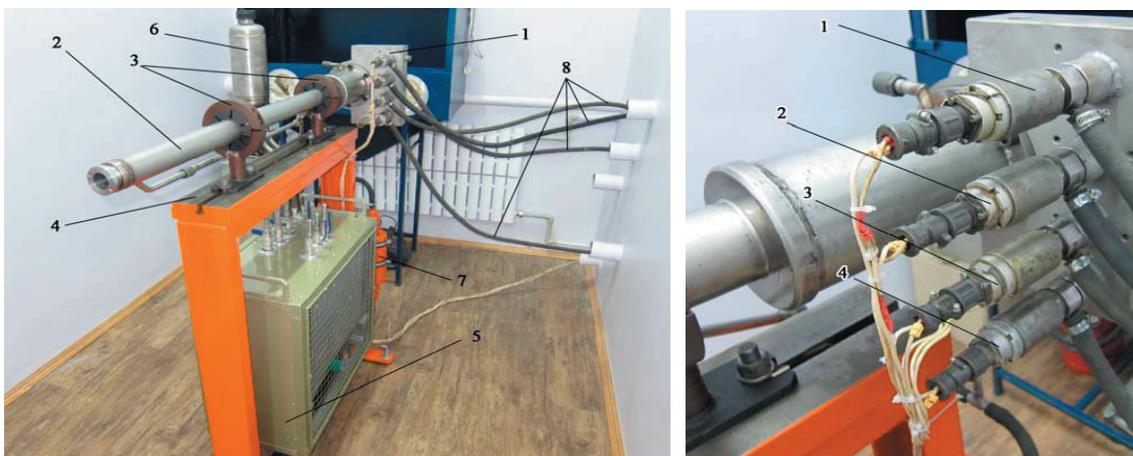
Для восстановления механического износа периферийной части лопатки целесообразно применение детонационно-газового метода нанесения покрытий, обладающего рядом преимуществ и обеспечивающего высокие показатели покрытий: прочность сцепления до 250 мПа, низкая пористость (0,5...1%), возможность нанесения тугоплавких материалов, отсутствие деформации напыляемой детали (температура детали не превышает 150...200°С), толщина наносимого покрытия может достигать 5000 мкм.

Цель работы

Исследование возможности восстановления размерного износа лопаток компрессора ГТД.

Результаты исследований

В настоящее время существенной доработке и модернизации был подвергнут комплекс УДК-II производства АО «Мотор-Сич», что позволило снизить



а)

б)

Рис. 1. Установка для детонационного нанесения покрытий: а – общий вид установки для детонационного нанесения покрытий: 1- узел газораспределения; 2 – охлаждаемый технологический канал; 3 – цанговые фиксаторы; 4 – станина; 5 – система охлаждения; 6 – расширительный бачок; 7 – пламегасители; 8 – магистрали подвода рабочих газов; б – узел газораспределения установки:
1...4 – электромагнитные клапаны

себестоимость нанесения покрытий на 20%, обеспечить варьирование технологических параметров в широком диапазоне, повысить надежность работы установки. Общий вид установки представлен на рис. 1.

Проведенные мероприятия позволили перейти на использование более дешевых и безопасных энергоносителей пропан-бутан и газа МАФ, для продувки ствола использовать сжатый воздух, а созданная САПР управления технологическими параметрами позволяет перейти на более качественный уровень получения градиентных покрытий с наперед заданными свойствами.

Применение детонационного нанесения покрытий обуславливает применение следующих технологических операций:

- выбор порошкового материала и гранулометрического состава;
- подготовка детали перед напылением покрытия;
- выбор оптимальных технологических режимов напыления;
- напыление покрытия;
- контроль качества покрытия;
- механическая обработка покрытия.

Наиболее перспективными материалами, способными продолжительно работать в условиях повышенных температур, являются оксидные и карбидные керамические материалы. При выборе материала для восстановления пера лопатки следует учесть, что оксидная керамика, например Al_2O_3 , имеет плотность в 3...3,7 раза меньшую, чем однокарбидные твердые сплавы, а теплостойкость значительно выше – по данным разных источников составляет 1100-1500°C. Приведенные аргументы однозначно свидетельствуют в пользу оксидной керамики, однако она является достаточно хрупкой и для повышения вязкости желателен ввод легирующих элементов, таких как диоксид циркония (до 16%) и оксид иттрия (до 3,5%). Уменьшение размера зерна и пористости минералокерамики приводит к росту износостойкости, прочности и твердости материала, размеры зерен следует снижать до 5...10 мкм, а плотность повышать до максимально возможной.

В связи с тем, что материалы покрытия и подложки имеют различные коэффициенты линейного расширения, для обеспечения переходной зоны, возникает необходимость использования подслоя из термореагирующих порошков с повышенным экзотермическим эффектом. В качестве подслоя был использован порошок ПТ-НА 01.

Подготовка поверхности перед нанесением покрытия проводилась следующим образом: ультразвуковая промывка, сушка струей сжатого воздуха, пескоструйная обработка частицами порошка карбида кремния фракцией до 300 мкм, обезжиривание этиловым спиртом. После подготовки поверхности проводились измерения, которые показали, что съем металла составляет не более 0,1 мм, а шероховатость лежит в пределах Rz 10...20 мкм.

Для нанесения покрытия на торцы лопаток целесообразно использовать многоместное приспособление (рис. 2)

Партия лопаток 1 устанавливаются в кассету 2, до пластины упора 3. Базирование лопаток осуществляется по замковым поверхностям в соответствующих пазах кассеты. Поджимаются лопатки пружинными элементами, расположенными напротив каждой лопатки на прижимной планке 5. Для защиты профиля пера лопатки, а так же для предотвращения краевого эффекта на кромках лопаток в приспособлении предусмотрен экран 3. Отверстия в экране эквидистанты к профилю пера лопатки с величиной 1 мм. Экран крепится на двух стойках 6, с возможностью регулировки в продольном направлении.

Для обеспечения равномерной подачи порошковых материалов в технологический канал установки дозатором вихревого типа, осуществлялась просушка порошка в печи при температуре 200...250°C, с выдержкой не менее 30 минут.

При нанесении покрытия, используя методику расчета, приведенную в работах [5,6], были назначены технологические режимы установки:

- частота выстрелов – 10, 20 Гц;
- состав смеси, C_3H_8/O_2 – 0,9...1,1;
- степень заполнения ствола, % - 0,9...1,1;
- дистанция напыления, мм – 100;
- глубина загрузки, мм – 900;

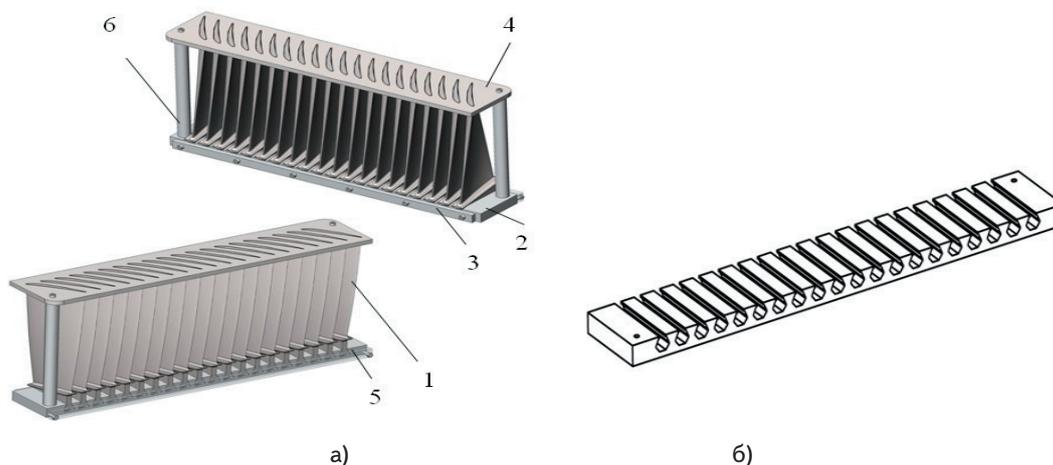


Рис. 2. Многоместное приспособление для установки лопаток: а – общий вид приспособления; б – кассета для установки лопаток

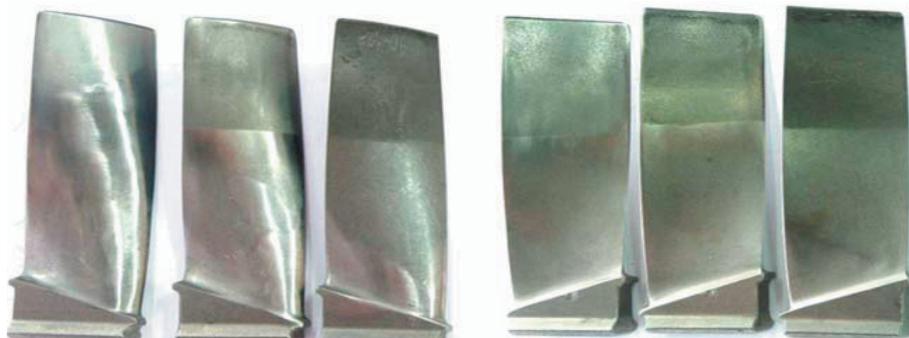


Рис. 3. Внешний вид лопаток со стороны спинки и корыта

- навеска порошка, г/выстрел – 0,2.

После нанесения покрытия проводился визуальный контроль (внешний вид лопаток со стороны спинки и корыта представлен на рис. 3), определение величины адгезии штифтовым методом на образцах свидетелях, а также микроанализ продольного шлифа (рис. 4).

Результаты испытаний образцов-свидетелей показали достаточно высокую прочность сцепления – до 150 МПа.

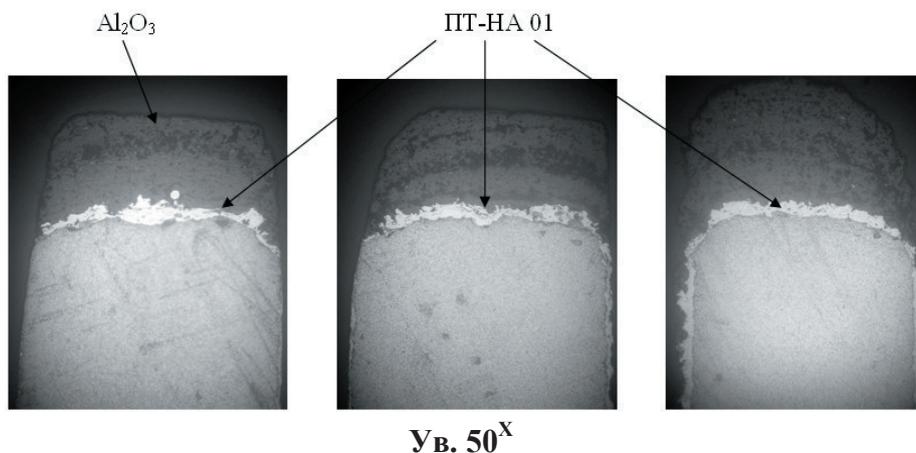


Рис. 4. Микрошлифы образцов лопаток

Выводы

Полученные детонационные покрытия из Al_2O_3 с повышенной адгезионной прочностью, низкой пористостью, позволяют рекомендовать предложенную технологию для продления жизненного цикла компрессорных лопаток ГТД после проведения ресурсных испытаний.

Литература

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. -М.: Машиностроение, 1988.-240 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника (Износ и безызносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: «Издательство МСХА», 2001. - 616 с.
3. Покрытия и обработка поверхности для защиты от коррозии и износа: Сб. статей под ред. К. Н. Страффорда, П. К. Даты, К. Дж. Гуджена. Пер. с англ./ под ред. В. В. Кудинова. – М. : Металлургия, 1991.
4. Качан А.Я., Богуслаев А.В., Павленко Д.В., Мозговой С.В. Отделочно-упрочняющие технологии обработки лопаток моноколес современных газотурбинных двигателей. //Вестник авиадвигателестроения. 2010. с. 81-91.
5. Долматов А. И., Горбачев А. Ф., Жеманюк П. Д., Добышев В. М., Сергеев С.В. Расчет процесса формирования детонационных покрытий по толщине. //Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, 1996. с. 121-126.
6. Долматов А. И., Михайлуца В. Г.,Сергеев С.В., Зорик И. В. Теоретическое исследование параметров процесса детонационного нанесения покрытий. Харьков, 1998. с. 135-149.