

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД

О.А. Быценко¹⁾, В.А. Шулов¹⁾, А.Г. Пайкин¹⁾, А.Н. Громов²⁾, А.Д. Теряев¹⁾, В.А. Панов¹⁾

¹⁾Московское машиностроительное предприятие имени В.В. Чернышева,
ул. Вишневая 7, 125362 Москва, Россия, oksivear@yandex.ru

²⁾Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют»,
пр. Буденного 16, 105118 Москва, Россия

Показано, что сильнооточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта лопаток компрессора и вентилятора из титановых сплавов с эрозионно-стойкими покрытиями, а также ремонта лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойкими покрытиями.

Введение

Совершенствование процессов производства и ремонта авиационных двигателей на всех этапах становления и развития гражданской авиации остается актуальным и востребованным [1].

Разработка новых прогрессивных технологий для повышения эффективности ремонтного производства газотурбинных двигателей с учетом специфики авиационного двигателестроения, актуальна, что послужило основой выбора темы исследования.

Успешно проведенные ранее исследования [2-4] позволили не только разработать опытные технологические карты ремонта, но также появилась необходимость и возможность создания промышленной установки. В соответствие с техническим заданием была сконструирована и изготовлена установка «Геза-ММП» для реализации процесса электронно-лучевой обработки на предприятиях авиационной промышленности.

Результатам исследований структурно-фазового и физико-химического состояний поверхностных и приповерхностных слоев в рамках отработки технологического процесса ремонта лопаток проточной части двигателей РД-33 и РД1700 посвящена данная работа.

Материалы и методики исследования

Исследования проводили на рабочих лопатках компрессора из титановых сплавов ВТ6, ВТ9 и ВТ8, стали ЭП866-Ш, а также на рабочих лопатках ТВД с жаростойкими покрытиями СДП2 и СДП2+ВСДП16, после эксплуатации. Все детали были отобраны в соответствии с имеющейся нормативной документацией на ремонт (наличие эксплуатационного налета и мелких забоин, повреждения покрытия, не приведших к изменению основного материала). Поверхность деталей исследовалась с помощью визуального осмотра, а также бинокулярного микроскопа в диапазоне увеличений от 2 крат до 50 крат. Лопатки до и после облучения также разрезались в поперечном сечении пера лопаток, а из полученных образцов-свидетелей изготавливались поперечные шлифы, в результате чего определялся удельный унос вещества в зависимости от плотности энергии и числа импульсов. Исследование физико-химического состояния поверхностных слоев деталей и образцов осуществлялось с использова-

нием методов: электронного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), рентгеноструктурного анализа (РСА); растровой электронной микроскопии (РЭМ); просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ); конфокальной лазерной и оптической микроскопии (ОМ), измерения микротвердости (H_v) и шероховатости (R_a), а также исследование уровня остаточных поверхностных напряжений на всех стадиях отработки технологического процесса ремонта с помощью сильнооточных импульсных электронных пучков (СИЭП).

Разработана методика оценки состояния поверхностного слоя и покрытия рабочих лопаток ГТД, имеющих наработку, и после проведения облучения с помощью СИЭП с целью удаления эксплуатационного налета, мелких дефектов и снятия покрытия, утратившего свои защитные свойства. Эти данные необходимы для определения числа импульсов, достаточного для полного удаления газонасыщенных при эксплуатации поверхностных слоев лопатки компрессора без покрытия, а также поврежденного жаростойкого покрытия (рабочие лопатки ТВД) и эрозионно-стойкого покрытия на лопатках компрессора. Данный подход применялся для оценки состояния поверхностного слоя после операции процесса электронно-лучевого ремонта.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Выполнены эксперименты по изучению кинетики удаления окисленных поверхностных слоев толщиной до 40 мкм, содержащих TiO_2 , Al_2O_3 и O_2 растворенный в α -фазе (до 20 ат. %, так называемый «альфированный» слой) с поверхности лопаток из титановых сплавов ВТ6, ВТ8 и ВТ9.

Поверхность лопаток исследовалась методами РЭМ, РСА и ОМ для определения толщин удаленных за импульс слоев, перекристаллизованной и модифицированной областей мишени. Аналогичным образом изучалась кинетика абляции с поверхности лопаток с покрытием на основе нитрида циркония (толщиной 20-24 мкм). Некоторые результаты этих исследований представлены на рис. 1.

Установлено, что при плотностях энергии ($w \geq 20$ Дж/см²) на поверхности облучаемых деталей из жаропрочных титановых сплавов с покрытием на основе нитрида циркония начинают интенсивно протекать процессы удаления покрытия

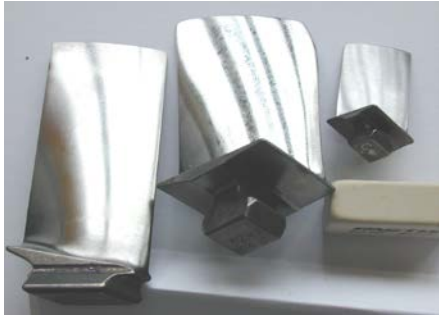


Рис. 1. Внешний вид лопаток КВД из сплавов ВТ9 и ВТ8 после электронно-лучевого удаления окисленных поверхностных слоев [1]

(рис. 2). За пять импульсов при плотности энергии 20-22 Дж/см² покрытие толщиной 20-25 мкм с поверхности всех участков лопатки удаляется полностью (рис. 1). Облучение с большими значениями плотности энергии также приводит к полному удалению покрытия, однако, на формируемой поверхности в этом случае образуется большое количество кратеров, и для выглаживания поверхностного слоя пера лопаток необходимо проводить повторное облучение в режиме плавления (18-20 Дж/см²).

На основании проведенных исследований методами РСА и аналитической электронной микроскопии, а также оптической металлографии установлено, что после электронно-лучевого удаления выработавшего ресурс покрытия и поверхностного выглаживания поверхности лопатки должна быть проведена финишная термообработка (или даже финишная термомеханическая обработка) для снятия остаточных растягивающих напряжений и стабилизации структурно-фазового состояния.

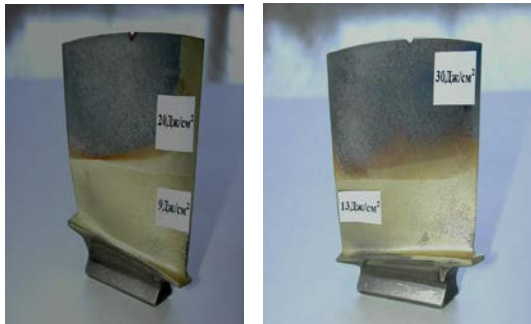


Рис. 2. Внешний вид лопаток ротора компрессора двигателя РД-1700 из сплава ВТ8 с покрытием из нитрида циркония после облучения с различными плотностями энергии в импульсе [1]

Уже при плотностях энергии выше 20 Дж/см² на поверхности облучаемых деталей из жаропрочных хромоникелевых сплавов начинают интенсивно протекать процессы удаления нагара. Установлено, что даже за два импульса при плотности энергии 20-22 Дж/см² нагар с поверхности всех участков лопатки удаляется полностью. Облучение с большими значениями плотности энергии также приводит к полному удалению нагара, однако микрорельеф формируемой

поверхности в этом случае имеет волнистый характер и для его выглаживания необходимо проводить повторное облучение в режиме плавления. На рис. 3 приведены результаты исследования кинетики абляции с поверхности лопаток компрессора двигателя РД-33 после 260 часов эксплуатации (сталь ЭП866ш, 7 ступень компрессора).

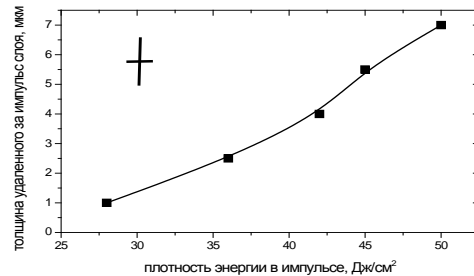


Рис. 3. Кинетика абляции с поверхности лопаток компрессора из стали ЭП866-Ш [1]

Облучение рабочих лопаток ТВД проводилось по следующему режиму удаления покрытия (в 4-х положениях) при плотности энергии $W = 45-50$ Дж/см² и числе импульсов, равном 10. На основании проведенных исследований было установлено, что в процессе облучения происходит процесс удаления наружного покрытия, на входной кромке и остальной поверхности данный процесс происходит более интенсивно: до ~12 - 25 мкм (входная кромка), ~ 11-30 мкм (остальная поверхность), ~3-5 мкм (выходная кромка). После облучения поверхность пера лопаток во всех исследуемых точках становится менее шероховатой, отсутствует эксплуатационный налет (рис. 4).

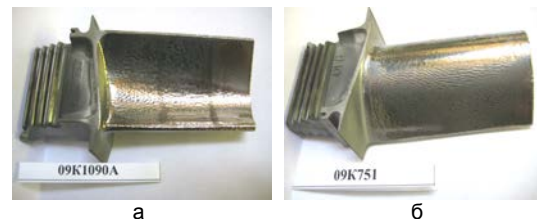


Рис. 4. Поверхность пера рабочей лопатки ТВД после облучения: а - со стороны корыта, б - со стороны спинки

Установлено, что при режиме облучения лопаток по режиму плотность энергии $W = 54-58$ Дж/см²; число импульсов: корыто – 5 импульсов, спинка – 10 импульсов (в 2-х положениях) является слишком интенсивным.

В процессе отработки технологии ремонта лопаток ГТД на основании полученных данных можно сделать вывод: несмотря на некоторые различия в геометрии лопаток различных двигателей, осуществление ремонта лопаток проточной части газотурбинного двигателя возможно. Более того, в процессе облучения с помощью СИЭП поверхности рабочих лопаток ТВД как при модификации жаростойкого покрытия, так в процессе ремонта при наличии перфорационных отверстий края их сглаживаются (тем самым снижается вероятность образования очагов зарождения усталостных

трещин). Следует заметить, что даже при плотности энергии 55-60 Дж/см² растрескивания по краям перфорационных отверстий не происходит (рис. 5).

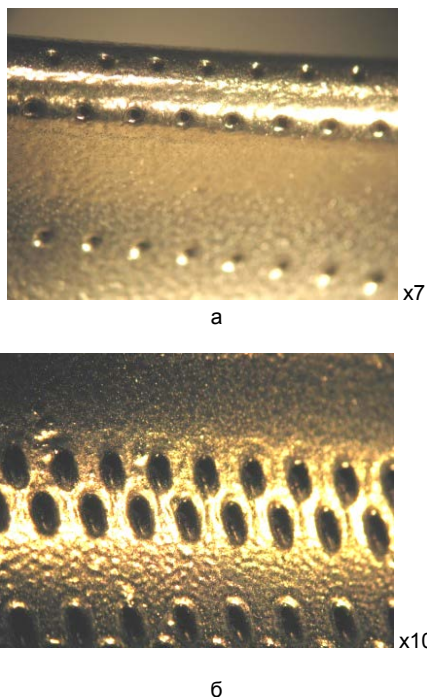


Рис. 5. Внешний вид перфорационных отверстий на поверхности лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ с покрытием СДП-2+ВСДП16 после облучения 5 импульсами при плотности энергии до 60 Дж/см²: а) на входной кромке; б) на корыте

Установлено, что высокоточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для контроля адгезии покрытий к подложке.

Заключение

Полученные данные исследований показали, что они согласуются с проведенными ранее исследованиями на стадии разработки опытной ремонтной технологии, основанной на использовании электронно-импульсной технологии. Анализируя данные исследований, можно сделать вывод, что СИЭП может стать востребованным инструментом для восстановления и ремонта особо ответственных деталей ГТД таких, как рабочие лопатки КНД, КВД и ТВД.

Список литературы

1. Шулов В.А., Новиков А.С., Энгелько В.И. и др. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения. М: Изд-во: ДИПАК, 2012. 292 с. Пайкин А.Г., Белов А.Б., Энгелько В.И. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 11. С. 9-18.
2. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 3. С. 37-40.
3. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 9. С. 22-27.
4. Пайкин А.Г., Крайников А.В., Шулов В.А., Быценко О.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Чикиряка А.В. // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 3. С. 56-60.

THE MAIN ASPECTS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ELECTRON BEAM REPAIR AND RESTORATION OF OPERATIONAL PROPERTIES OF ROTOR BLADES OF GTE

O.A. Bytzenko¹, V.A. Shulov¹, A.G. Paikin¹, A.N. Gromov², D.A. Teryaev¹, V.A. Panov¹

¹Chernyshev Machine Building Enterprise,

7 Vishnevaya str., 125362 Moscow, Russia, oksiwear@yandex.ru

²Salyut Gas Turbine Engineering Research and Production Center,
16 Budenny ave., 105118 Moscow, Russia

It has been shown that high-current pulsed electron beam microsecond duration is a highly effective tool for repair of the compressor and fan blades from titanium alloys with corrosion-resistant coating, as well as repair of turbine blades of high-temperature nickel alloys with heat-resistant coatings.

The obtained research data have shown that they are consistent with earlier research on the stage of development of experimental repair technology based on the use of electron-pulse technology. Analyzing research data, we can conclude that high current pulsed electron beams can become a popular tool for recovery and repair of critical parts such as aircraft engine blades.