

## РАЗРАБОТКА ОСНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ СТАЛИ 15Х16К5Н2МВФАБ С ЖАРОСТОЙКИМ АЛЮМИНИДНЫМ ПОКРЫТИЕМ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

О.А. Быценко<sup>1)</sup>, А.В. Широкожухов<sup>2)</sup>, А.Н. Громов<sup>2)</sup>, Н.А. Лобачев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе 4, Москва 125993, А-80, ГСП-3, Россия, oksiwear@yandex.ru

<sup>2)</sup>АО «ММП имени В.В. Чернышева»,  
Вишневая ул. 7, Москва 123362, А-80, ГСП-7, Россия, shirokozhukhov\_a@avia500.ru

В данной работе показана возможность использования облучения высокointенсивными импульсными электронными пучками для удаления эксплуатационного налета и деградированного жаростойкого алюминида покрытия компрессорных лопаток из стали 15Х16К5Н2МВФАБ-Ш. Установлено, что для удаления покрытия и эксплуатационного налета необходимо реализовать облучение с плотностью 26-28 Дж/см<sup>2</sup>. При меньших плотностях энергии удаление материала не происходит. На основании данных металлографического исследования продемонстрировано, что после ремонта лопаток под новым покрытием наблюдается модифицированный слой глубиной до ~25 мкм, а дефектов покрытия не имеется. Микротвердость модифицированного слоя по сравнению основным материалом лопатки возросла на 40%. Результаты усталостных испытаний весьма неоднозначны, так как часть лопаток разрушилась до достижения контрольного уровня. Предполагается, что это связано с формированием остаточных растягивающих напряжений, которые в свою очередь и приводят к снижению предела выносливости при холодных испытаниях на усталость.

**Ключевые слова:** высокointенсивные импульсные электронные пучки; лопатки газотурбинного двигателя; исследование структуры; диффузионные ионно-плазменные покрытия; технология ремонта.

## DEVELOPMENT OF THE FUNDAMENTALS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR REPAIRING COMPRESSOR BLADES MADE OF 15X16K5N2MVFAB STEEL WITH A HEAT-RESISTANT ALUMINIDE COATING USING HIGH-INTENSITY PULSED ELECTRON BEAMS

О.А. Bitsenko<sup>1)</sup>, А.В. Shirokozhukhov<sup>2)</sup>, А.Н. Gromov<sup>2)</sup>, Н.А. Lobachev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),  
4 Volokolamskoye shosse, 125993 Moscow, Russia, oksiwear@yandex.ru

<sup>2)</sup>Chernyshev Machine Building Enterprise,  
7 Vishnevaya Str., A-80, GSP-7, 123362 Moscow, Russia, shirokozhukhov\_a@avia500.ru

This paper shows the possibility of using high-intensity pulsed electron beam irradiation to remove operational plaque and degraded heat-resistant aluminide coating of compressor blades made of corrosion-resistant heat-resistant steel 15Х16К5Н2МВФАБ. The blades of the compressor blades with a two-layer protective coating Ni-Cr-Al-Y + NiAl were used as objects of research. The irradiation was performed on an experimental experimental electron beam installation "GEZA-MMP" at various energy densities in the range from 20 J/cm<sup>2</sup> to 40 J/cm<sup>2</sup>. The state of the material in the surface layers of the samples was studied by optical metallography, and microhardness was measured on a PMT-3 device at a load of 20 grams. In addition, fatigue tests were carried out according to the standard method based on tests of 2·10<sup>6</sup> cycles at room temperature (on magnetostrictive and electrodynamic vibration stands with a complex of measuring equipment). It has been established that in order to remove the coating and operational plaque, it is necessary to carry out irradiation with a density of 26-28 J/cm<sup>2</sup>. At lower energy densities, material removal does not occur. Based on the data of the metallographic study, it was demonstrated that after repairing the blades using the proposed technology, a modified layer with a depth of up to ~25 microns is observed under the new coating, and there are no defects in the new coating. The microhardness of the modified layer increased by 40% compared to the main blade material. According to the fatigue tests, three blades did not

pass the control level, with destruction along the back of the pen. It is known that treatment with high-current pulsed electron beams almost always leads to the formation of residual tensile stresses and to a decrease in the endurance limit during cold fatigue tests. To remove the residual tensile stresses, diffusion vacuum annealing must be performed. Affiliation, full postal address, e-mail address (for each author if different).

**Keywords:** high-intensity pulsed electron beams; gas turbine engine blades; structural research; diffusion ion-plasma coatings; repair technology.

## Введение

Рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя относят к классу наиболее ответственных деталей, работающих под действием статических, динамических, циклических нагрузок, а также в условиях коррозионной и эрозионной повреждаемости пера лопаток [1]. Изготовление лопаток компрессора является сложным и дорогостоящим процессом. В последние десятилетия ученые, как в России, так и за рубежом разрабатывают технологии удаления эксплуатационного налета и деградированного защитного жаростойкого покрытия с поверхности ответственных деталей, направленные на сохранение геометрии обрабатываемой детали [2]. Особая роль уделяется технологиям ремонта, которые обладают так называемой избирательности удаления покрытий, снижение нагрузки на экологию и вредного воздействия технологий на здоровье человека [3].

Целью данной работы является разработка основ ремонтной технологии лопаток компрессора из коррозионностойкой жаропрочной стали 15Х16К5Н2МВФАБ-Ш с двухслойным защитным покрытием СДП-1 и NiAl. Покрытие наносится методом вакуумно-плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ) на установке МАП-1. После нанесения покрытия реализуется процесс диффузионного отжига при температуре 650°C. При эксплуатации процесс окисление реализуется в условиях усталостного нагружения и толщины деградированных поверхностных слоев могут достигать 10-50 мкм в течение 1000 часов.

В этой связи актуальным и экономически обоснованным представляется создание технологии ремонта этих лопаток, включающей в себя собственно удаление

этих деградированных слоев с помощью высокоинтенсивных импульсных электронных пучков с последующим нанесением нового покрытия.

## Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были использованы лопатки лопаток компрессора из коррозионностойкой жаропрочной стали 15Х16К5Н2МВФАБ-Ш с двухслойным защитным покрытием Ni-Cr-Al-Y + NiAl. Облучение проводили на экспериментальной опытно-промышленной электронно-лучевой установке «ГЕЗА-ММП» при различных плотностях энергии от 20 до 40 Дж/см<sup>2</sup>.

Состояние материала в поверхностных слоях образцов исследовалось методами оптической металлографии с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 и замера микротвердости на приборе ПМТ-3 при нагрузке 20 грамм. Кроме того, проведены усталостные испытания в соответствии с нормативной документацией по стандартному методу на базе испытаний 2·10<sup>6</sup> циклов при комнатной температуре. Испытания проводились на магнитострикционном и электродинамическом вибростендах с комплексом измерительной аппаратуры.

## Результаты и их обсуждение

Было показано, что для удаления покрытия и эксплуатационного налета необходимо реализовать облучение с плотностью 26-28 Дж/см<sup>2</sup>. При меньших плотностях энергии удаление материала не происходит. После полного удаления покрытия наносилось новое покрытие по серийной технологии. После этого был проведен металлографический анализ.

Металлографический анализ показал, что полностью удалено старое покрытие,

а также имеется модифицированный слой, глубиной до ~25 мкм, новый слой соответствует требованиям нормативной документации. Дефектов вновь нанесенного покрытия и изменений в основном материале лопатки не обнаружено. Микротвердость основного материала лопатки по сравнению с модифицированным слоем меньше на 40%.

Далее была подготовлена партия лопаток в количестве 5 штук, которые подверглись следующим операциям разработанного технологического процесса, а именно: электронно-лучевое удаление отработанных покрытий, полирование кромок, нанесение нового покрытия, диффузионный отжиг на воздухе. Одна лопатка исследовалась методом оптической металлографии, а четыре оставшиеся подвергались усталостным испытаниям.

Из полученных исследовательских данных следует, что структурные изменения в поверхностном слое полностью соответствуют данным полученным ранее. По данным усталостных испытаний три лопатки не прошли контрольный уровень, с разрушением по спинке пера. Известно, что обработка сильноточными импульсными электронными пучками почти всегда приводит к формированию остаточных растягивающих напряжений и к сни-

жению предела выносливости при холодах испытаниях на усталость. Для их снятия необходимо проводить диффузионный вакуумный отжиг.

### **Заключение**

Реализация технологического процесса ремонта лопаток компрессора из стали 15Х16К5Н2МВФАБ-Ш с двухслойным защитным покрытием Ni-Cr-Al-Y + NiAl, является перспективным, но требует уточнения.

### **Библиографические ссылки**

1. Шулов В.А., Новиков А.С., Энгелько В.И. Сильноточные электронные импульсные пучки для авиационного двигателестроения. Москва: Артек; 2012. 292 с.
2. Быченко О.А., Филонова Е.В., Марков А.Б., Белова Н.А. Влияние облучения сильноточными электронными пучками на поверхностные слои современных жаропрочных никелевых сплавов с ионноплазменными покрытиями различного состава. *Труды ВИАМ. Электрон. журнал* 2016. 42(6): 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10.
3. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быченко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Разработка электроннолучевого технологического процесса восстановления свойств лопаток турбины ГТД из сплава ЖС26НК с жаростойким покрытием NiCrAlY. *Упрочняющие технологии и покрытия* 2010; (3): 34-38.