

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА АДГЕЗИЮ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ NiCrAlY НА ЛОПАТКАХ ТУРБИНЫ ГТД ИЗ СПЛАВА ЖС26НК

А.С. Новиков¹⁾, В.А. Шулов²⁾, О.А. Быценко²⁾, Д.А. Теряев²⁾,
А.Д. Теряев¹⁾, В.И. Энгелько³⁾, К.И. Ткаченко³⁾

¹⁾ММП имени В.В. Чернышева, 123362 Москва, А-80, ГСП-7, Вишневая ул. 7, Россия,
тел.: (7-095) 4914988, факс: (7-495) 491565, e-mail: teryaev_a@avia500.ru

²⁾Московский авиационный институт (государственный технический университет), 125993,
Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе 4, Россия;
тел.: (7-499) 1584424, факс: (7-499) 1582977, e-mail: shulovva@mail.ru

³⁾НИИ электро-физической аппаратуры имени Д.В. Ефремова, 189631, Санкт-Петербург,
Металлострой, дорога на Металлострой 1, Россия; тел.: (7-812) 4627845,
факс: (7-812) 4639812, e-mail: engelko@niiefa.spb.ru

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии режимов облучения сильноточными импульсными электронными пучками (СИЭП) на адгезию защитного покрытия NiCrAlY на лопатках из сплава ЖС26НК. Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для контроля адгезии жаростойких покрытий на поверхности монокристаллических лопаток из жаропрочных сплавов. Применение СИЭП позволяет на стадии модификации физико-химического состояния защитного покрытия NiCrAlY проводить контроль качества турбинных лопаток. Установлено, что при реализации ремонта турбинных лопаток с помощью СИЭП не удастся подготовить поверхность для нанесения нового защитного покрытия без пескоструйной обработки.

Введение

Из представленных в [1-5] данных следует, что среди серийных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов присутствуют отдельные экземпляры, содержащие достаточно крупные зерна 100-200 мкм, формируемые за счет ликвационных или сегрегационных процессов на стадиях литья или высокотемпературного отжига; практически во всех лопатках присутствует поликристаллическая «рубашка», образующаяся в зоне сцепления покрытия с подложкой из-за использования при подготовке поверхности под нанесение покрытия пескоструйной обработки и последующего, уже после осаждения, высокотемпературного отжига. Формируемое по серийной технологии ВПТВЭ (вакуумно-плазменная технология высоких энергий) покрытие, характеризуется высокой степенью неоднородности фазового и элементного составов [6], содержит протяженные области с низкой концентрацией алюминия и заметным присутствием элементов жаропрочного сплава; последнее объясняет неудовлетворительную жаростойкость вакуумно-дугового покрытия. Электронно-лучевая обработка приводит к образованию однородного «безпористого» слоя толщиной 20-25 мкм с концентрацией алюминия до 9-10 мас. %, что обеспечивает более высокий уровень эксплуатационных свойств облученных лопаток по сравнению серийными.

Кроме того, формируемые в процессе высокоскоростного нагрева, плавления и кристаллизации термические напряжения могут приводить к отслаиванию покрытия, если система подложка-покрытие обладала до облучения низкой адгезией (рис. 1). Еще одна важная проблема, связанная с адгезией покрытий,

возникает при ремонте лопаток, когда с помощью электронного пучка удается удалить деградированное при эксплуатации покрытие и необходимо нанести новое покрытие. Можно ли исключить пескоструйную и химическую обработки и ограничиться просто облучением электронным пучком?

Исследование влияния режимов облучения СИЭП на адгезию вновь наносимых покрытий NiCrAlY на поверхность ремонтируемых лопаток являлось основной целью данной публикации.



Рис. 1. Внешний вид дефектной лопатки турбины из сплава ЖС26НК с NiCrAlY вакуумно-плазменным покрытием после облучения.

Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования использовались лопатки турбины двигателя РД-33 и образцы из сплава ЖС26НК (Ni; 1,0-Ti; 5,6 – Cr; 6,2-Al; 1,4-Mo; 10,0-Co; 1,2-V; 1,4-N; 12,5-W; 0,18-C; <0,1-O, N;<0,02-H; <0,015-B, термообработка: отжиг при 1250 °С в вакууме в

течение 3 час, охлаждение со скоростью 50-60 град/мин, стабилизирующий отжиг при 1000 °С в вакууме в течение 2 час) с 60-100-микронным покрытием СДП-2 (основа-Ni; 18-22-Cr, 11-13,5-Al, 0,3-0,6-Y), нанесенным на установке МАП-1 по методике ВИАМ [6]. Часть лопаток до облучения разрезалась на электроэрозионном станке и исследовалась методами: экзoeлектронной эмиссии, сканирующей электронной спектроскопии, рентгеноструктурного анализа и оптической металлографии в поляризованном свете. Кроме этого измерялись микротвердость (H_u) и шероховатость (R_a). Удаление защитного покрытия с помощью СИЭП проводилось на ускорителе «Геза-2» (энергия электронов - 115-150 кэВ; длительность импульса - 30-60 мкс; плотность энергии в пучке - 50-80 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка - 30-80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка - 5%, число импульсов - 10). Далее лопатки облучались на ускорителе «Геза-1» при варьировании плотности энергии в импульсе от 18-20 до 45-50 Дж/см², на их поверхность наносилось новое 60-100-микронное покрытие СДП-2 и проводился вакуумный диффузионный отжиг при 1050 °С в течение 2 часов. Лопатки после реализации этих операций разрезались, а из полученных образцов-свидетелей изготавливались поперечные шлифы, поверхность которых исследовалась методом оптической металлографии для оценки адгезии полученный покрытий.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Некоторые результаты исследования лопаток с удаленным сильноточным импульсным электронным пучком покрытием и новым покрытием, нанесенным на установке МАП-1 после электронно-лучевой обработки при различных плотностях энергии в импульсе представлены на рис. 2-5 и в таблице 1.

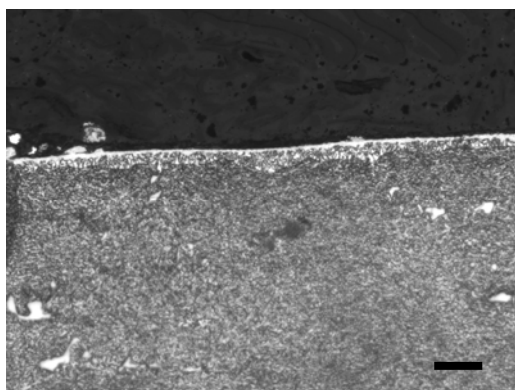


Рис. 2. Микроструктура в поверхностном слое образца с 60-микронным покрытием СДП-2 после его полного удаления при $w=55$ Дж/см² десятью импульсами.

Полученные данные свидетельствуют о следующем:
- полученные методом ВПТВЭ покрытия NiCrAlY на ремонтных лопатках адекватны покрытиям на

Таблица 1. Влияние плотности энергии в импульсе w и числа импульсов n на шероховатость поверхности, экзoeлектронную эмиссию, остаточные напряжения и микротвердость NiCrAlY вакуумно-плазменного покрытия, осажденного на поверхности образцов из жаропрочного сплава ЖС26НН.

w , Дж·см ⁻²	n , имп	R_a , мкм, ±0.05	$I_{\text{ее}}$, имп/с	σ , МПа ±50	H_u , ед. HV, p=2 Н
-	-	2.12	240±60	-170	420-490
23-25	5	1.14	390±90	+120	440-520
23-25	10	1.03	420±40	+130	460-510
42-45	5	0.36	610±30	-60	480-490
42-45	10	0.32	620±20	-70	470-480
50-55	5	0.99	720±80	-90	390-530
50-55	10	1.12	740±70	-100	380-520

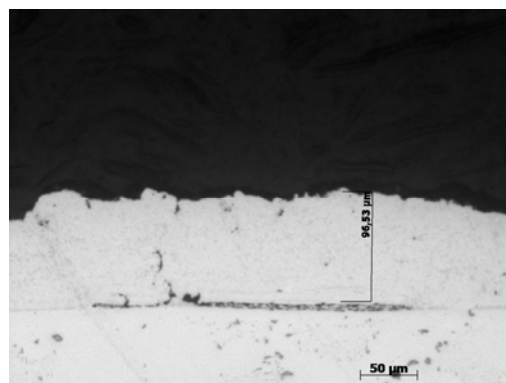


Рис. 3. Микроструктура в поверхностном слое образца с покрытием СДП-2 после его повторного нанесения на поверхность лопатки, облученной при $w=23-25$ Дж/см² тремя импульсами.

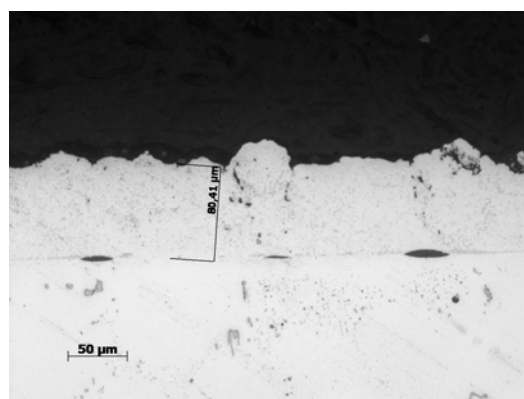


Рис. 4. Микроструктура в поверхностном слое образца с покрытием СДП-2 после его повторного нанесения на поверхность лопатки, облученной при $w=34-36$ Дж/см² тремя импульсами.

серийных лопатках по химическому и фазовому составу, а также структуре;

- зона сцепления покрытия и подложки из матричного сплава содержит несплошности и микровключения вне зависимости от режима предварительного облучения, реализованного на стадии подготовки поверхности под нанесение покрытия.

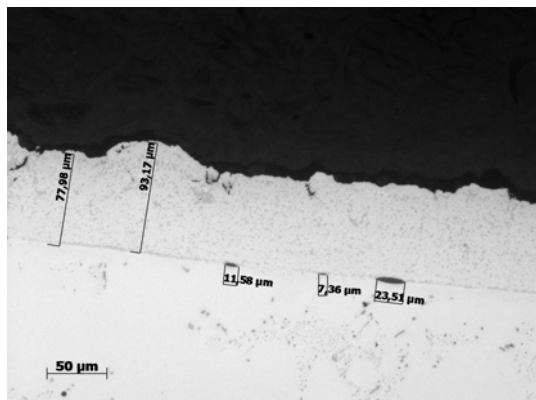


Рис. 5. Микроструктура в поверхностном слое образца с покрытием СДП-2 после его повторного нанесения на поверхность лопатки, облученной при $w=42-45$ Дж/см² тремя импульсами.

Таким образом, несмотря на высокотемпературный вакуумный отжиг ремонтных лопаток, не удается добиться удовлетворительной адгезии покрытия к подложке. Хотя при облучении с плотностями энергии 23-36 Дж/см² из-за протекания процесса абляции формируется развитая поверхность с большим количеством кратеров, не происходит механического сцепления на стадии взаимодействия микрокапель с поверхностью подложки на всех ее участках и, в частности, в окрестности свободного от кратеров перекристаллизованного материала. Поэтому после электронно-лучевого удаления деградированного при эксплуатации покрытия, необходимо реализовать процесс осаждения

нового покрытия СДП-2 по серийной вакуумно-плазменной технологии высоких энергий, которая включает операции механической обработки (пескоструйная обработка), химической и термической обработок.

Закключение

Показано, что сильнооточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для контроля адгезии покрытий к подложке и для ремонта лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойкими покрытиями [7]. Однако применение СИЭП для ремонта не позволяет отказаться от операции пескоструйной обработки на стадии подготовки поверхности под нанесение нового защитного покрытия методом ВПТВЭ.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-00672-а, Министерства образования и науки РФ и ММП имени В.В. Чернышева.

Список литературы

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. - М.: Машиностроение. - 1988. - 240 с.
2. Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. и др. // ж. Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2003. - №3. - С. 41-49.
3. Белов А.Б., Крайников А.В., Львов А.Ф. и др. // ж. Двигатель. - №1. - 2006. - С. 6-8.
4. Белов А.Б., Крайников А.В., Львов А.Ф., Пайкин А.Г., Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. // Двигатель. - 2006. - 2. - С. 8-11.
5. Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. и др. // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2003. - 3. - С. 41-49.
6. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). - М.: МИСиС, 2001. - 632 с.
7. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 3. - 2010. - С. 37-40.

THE EFFECT OF INTENSE PULSED ELECTRON BEAM IRRADIATION ON THE ADHESION OF NiCrAlY ARC-VACUUM COATINGS OF GAS TURBINE ENGINE BLADES FROM GhS26NK ALLOY

A.S. Novikov¹⁾, V. A. Shulov²⁾, O. A. Bytsenko²⁾, D. A. Teryaev²⁾, A. D. Teryaev¹⁾, V. I. Engelko³⁾, K.I. Tkachenko³⁾

¹⁾Chernyshev Machine Building Enterprise, 7 Vishnevaya Street, A-80, GSP-7, Moscow 123362, Russia, Tel.: (495) 4914988, Fax: (495) 4915652, E-mail: teryaev_a@avia500.ru

²⁾Moscow Aviation Institute, 4 Volokolamskoye shosse, A-80, GSP-3, Moscow 125993, Russia, Tel.: (499) 1584424, Fax: (499) 1582977, E-mail: shulovva@mail.ru

³⁾Efremov Institute of Electro-physical Apparatus, 1 Sovietsky Avenue, Metallostroy, St. Petersburg 189631, Russia; Tel.: (812) 4627845, Fax: (812) 4639812, E-mail: engelko@niiefa.spb.ru

The present paper reviews the experimental results dedicated to the effect of irradiating conditions with intense pulsed electron beams on the adhesion of NiCrAlY resistant coatings to gas turbine engine blades from GhS26NK alloy. It is shown that intense pulsed electron beam of microsecond duration is high effective instrument for repair of turbine blades from refractory nickel alloys with resistant coatings.