

ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРФОРАЦИОННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

А.Н. Громов¹⁾, В.А. Шулов²⁾, О.А. Быценко²⁾, Д.А. Теряев²⁾, А.Д. Теряев¹⁾, В.И. Энгелько³⁾

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 (Национальный исследовательский 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 электрофизической 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

Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта и модифицирования лопаток турбины с перфорированными отверстиями без снижения усталостной прочности.

Введение

Одной из практически важных задач технологического плана является выявление возможного растрескивания поверхности лопаток турбины с покрытием СДП-2 при их ремонте с применением сильноточных импульсных электронных пучков (СИЭП), когда обрабатываются лопатки ТВД с перфорированными отверстиями (Рис. 1-3). Последние наносятся с целью снижения допустимых температур на лопатках за счет принудительного охлаждения конвективными потоками внутри деталей. Эти лопатки изготавливаются из монокристаллического сплава ЖС32ВИ [1] с последующим нанесением защитного покрытия методом вакуумно-плазменной технологии высоких энергий [1]. Есть опасения, что при модифицировании поверхности серийных лопаток и при удалении пучком поврежденного при эксплуатации покрытия возможно формирование микротрещин в окрестности кромок отверстий, из-за наведения остаточных растягивающих остаточных напряжений. Однако такого рода исследований пока реализовано не было. В этой связи целью настоящей публикации являлось проведение контрольных экспериментов по влиянию облучения СИЭП при разных плотностях энергии в импульсе на процесс трещинообразования в зонах, прилегающих к кромкам отверстий.

Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования использовались лопатки турбины двигателя РД-33 и образцы из сплава ЖС32ВИ (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 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 [2].

Часть лопаток до облучения разрезалась на электроэрозионном станке и исследовалась методами: электронной Оже-спектроскопии, сканирующей электронной спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, экзо-электронной эмиссии и оптической металлографии, как в окрестности кромок перфорационных отверстий, так и на свободных от них участках поверхности. Кроме этого измерялись микротвердость (H_v) и шероховатость (R_a). Обработка лопаток СИЭП проводилась на ускорителях «Геза-1» и «Геза-ММП» (энергия электронов – 115-125 кэВ; длительность импульса – 30-80 мкс; плотность энергии в пучке – 20-60 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка – 30-80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка – 5%) [3].

Лопатки после облучения также разрезались, а из полученных образцов-свидетелей изготавливались поперечные шлифы, в результате чего определялось влияние пучка на внутренние поверхности отверстий. Наконец были реализованы сравнительные усталостные испытания серийных лопаток, а также лопаток подвергнутых модифицированию сильноточных импульсных электронных пучков и финишной термообработке в вакууме при 1050 °С в течение 2 часов для снятия остаточных напряжений.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Для проведения контрольного облучения из лопаток вырезались образцы, содержащие как минимум по 5 перфорационных отверстий. Обработка мишеней СИЭП проводилась на ускорителях «Геза-1» и «Геза-ММП» (энергия электронов – 115-150 кэВ; длительность импульса – 30-40 мкс; плотность энергии в пучке – 20-60 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка – 30-80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка – 5%; рис. 1). Образцы после облучения анализировались методом оптической металлографии с поверхностей как непосредственно мишеней, так и изготовленных поперечных шлифов. Результаты

этого исследования частично представлены на рис. 2-6.



Рис. 1. Внешний вид установки «Геза-ММП»

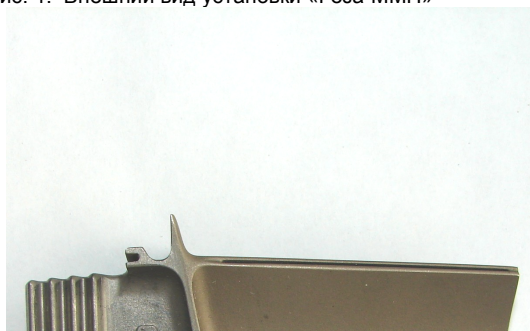


Рис. 2. Внешний вид лопатки ТВД с перфорационными отверстиями

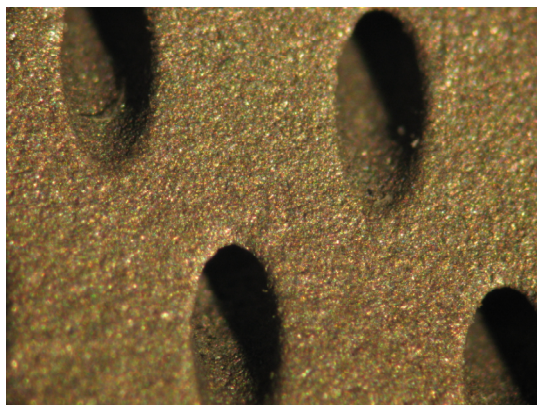


Рис. 3. Внешний вид перфорационных отверстий на поверхности лопатки ТВД из сплава ЖС32ВИ с покрытием СДП-2.

Из этих данных видно, что процесса растрескивания при обработке даже с плотностью энергии 55-60 Дж/см², при которой реализуется ремонт лопаток [4], не происходит.

После этого облучались серийные лопатки в установке «Геза-ММП» при плотности энергии 42-45 Дж/см² четырьмя импульсами в режиме вращения мишеней, когда происходит модификация поверхностей и спинки и корыта. После этого мишени отжигались в вакууме при 1050 °С в течение 2 часов для снятия остаточных напряжений и разрезались на образцы для проведения исследования физико-химического состояния, зафиксированного в окрестности кромок отверстий и на свободной от них поверхности. Эти результаты

представлены на рис. 7, 8 и в таблице 1. Из этих данных видно, что химический состав, фазовый состав и основные структурные характеристики на различных участках поверхности практически адекватны.

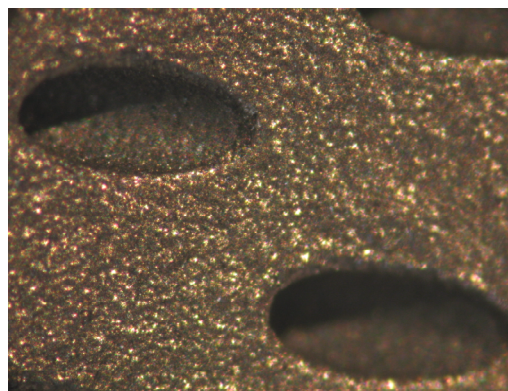


Рис. 4. Внешний вид перфорационных отверстий на поверхности лопатки ТВД из сплава ЖС32ВИ с покрытием СДП-2 после облучения 1 импульсом при плотности энергии 20-22 Дж/см²

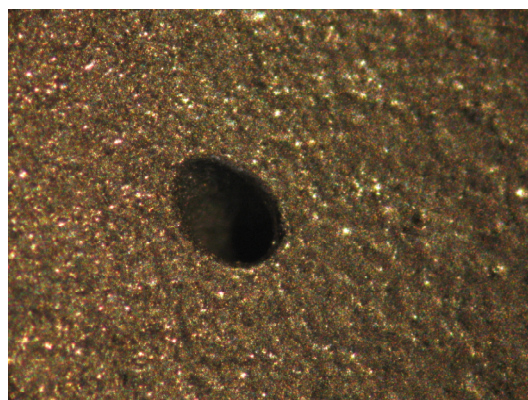


Рис. 5. Внешний вид перфорационных отверстий на поверхности лопатки ТВД из сплава ЖС32ВИ с покрытием СДП-2 после облучения 1 импульсом при плотности энергии 20-22 Дж/см²

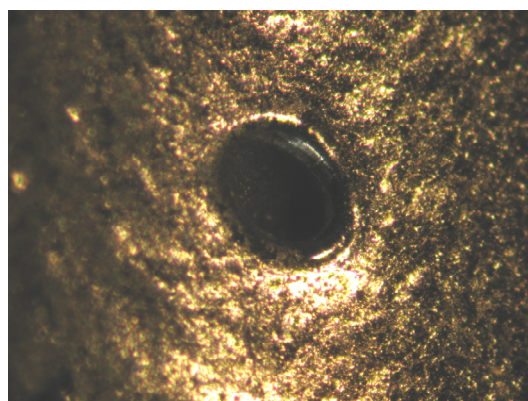
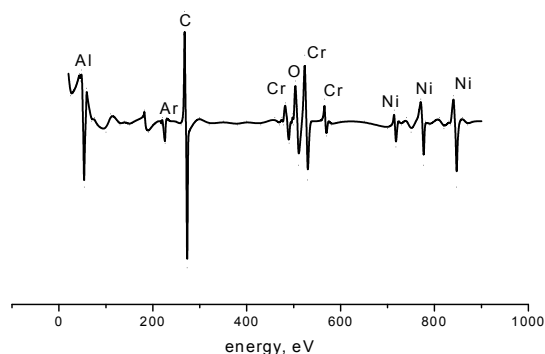


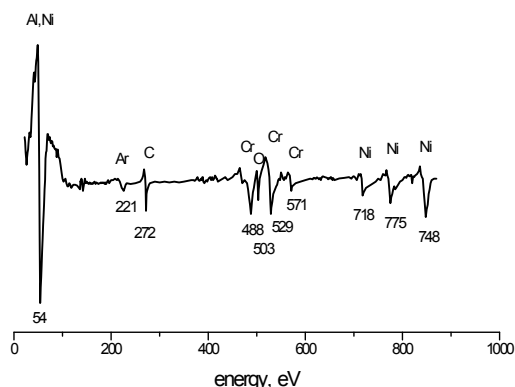
Рис. 6. Внешний вид перфорационных отверстий на поверхности лопатки ТВД из сплава ЖС32ВИ с покрытием СДП-2 после облучения 5 импульсами при плотности энергии 55-60 Дж/см²

Таблица 1 — Шероховатость, интенсивность экзoeлектронной эмиссии, остаточные напряжения и микротвердость, определенные с поверхности серийной (1) и облученной лопаток в окрестности отверстий (3) и вдали от них (2)

№	R_a , мкм, ± 0.05	I_{eee} , имп/с	σ , МПа ± 50	H_{μ} , ед. HV, $p=2$ Н
1	2.20	300 $\pm$ 60	-170	420-490
2	0.85	650 $\pm$ 30	-100	480-490
3	0.90	620 $\pm$ 20	-50	490-520



a



б

Рис. 7. Фрагменты Оже-спектров, зарегистрированных с поверхности серийных лопаток (а) и лопаток после электронно-лучевой обработки в окрестности перфорационного отверстия

Из этих данных непосредственно следует, что обработка сильноточным электронным пучком, по крайней мере, не снижает усталостную прочность лопаток. Полученные результаты вполне ожидаемы и соответствуют основной концепции усталостного разрушения деталей из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойким покрытием, рассмотренной в работе [6]: очаг разрушения чаще всего располагается в мелкокристаллическом слое в зоне адгезии покрытия к подложке, в объеме детали в окрестности дефектов литья или механических дефектов, сформированных на поверхности лопатки до нанесения покрытия; усталостная трещина может зарождаться непосредственно на поверхности покрытия, но ее рост

в матричный материал не реализуется достаточно длительный период времени.

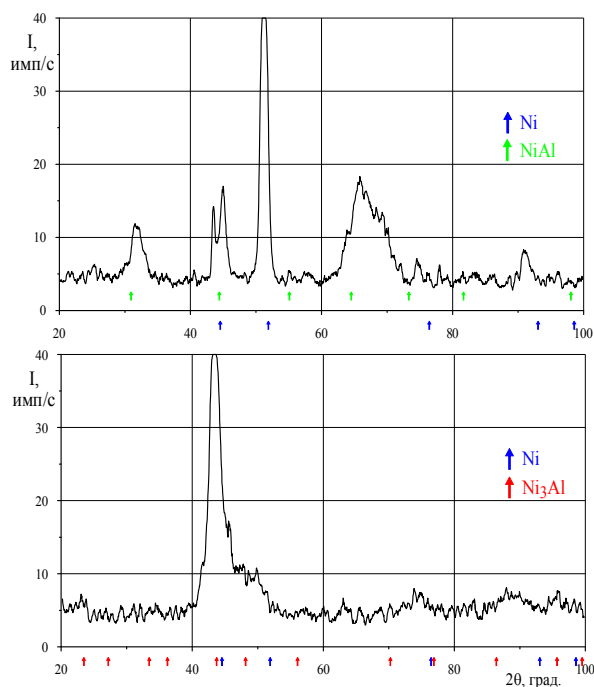


Рис. 8. Дифрактограммы, снятые из окрестности перфорационного отверстия до и после облучения электронным пучком по режиму 42-45 Дж/см²

Результаты усталостных испытаний, выполненных на лопатках при комнатной температуре, представлены в таблице 2.

Отсюда следует, что увеличение предела выносливости деталей из никелевых сплавов с покрытием СДП-2, обработанных электронным пучком, можно ожидать только за счет барьерных возможностей модифицированного слоя, в котором формируются остаточные сжимающие напряжения. При толщине последнего 20-25 мкм увеличение предела выносливости будет несущественным или ограниченным единицами процентов. Особенно нечувствительность обработки СИЭП к усталостным свойствам проявляется при испытаниях серийных лопаток, деталей сложной формы, при изготовлении которых формируется большое разнообразие дефектов как на внешней, так и на внутренней поверхностях лопаток, в матричных слоях, в окрестности перфорационных отверстий и др. (табл. 2).

Заключение

Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для модифицирования и ремонта лопаток турбины с перфорационными отверстиями.

Установлено, что модифицирование и восстановление свойств лопаток турбины с перфорационными отверстиями сильноточный импульсный электронный пучок не снижает усталостной прочности деталей.

Таблица 2 — Результаты усталостных испытаний лопаток с перфорационными отверстиями после облучения электронным пучком при 42-45 Дж/см² и после вакуумного отжига при 1050 °С в течение 2 часов

σ кгс/ мм ²	f Гц	N Число циклов до разруше- ния	Остаточные напря- жения, результаты испытаний, очаг
22	3804	$2,07 \cdot 10^7$	-123 МПа, без раз- рушения
22	3685	$2,10 \cdot 10^7$	-113 МПа, без раз- рушения
22	3350	$1,21 \cdot 10^6$	-79 МПа, разруше- ние по входной кромке, по радиусу перехода к пера в полку, очаг в окре- стности дефекта мехобработки
20	3776	$4,75 \cdot 10^6$	-147 МПа, разруше- ние по полке замка
20	3842	$2,17 \cdot 10^7$	-231 МПа, без раз- рушения
20	3274	$2,08 \cdot 10^7$	-127 МПа, без раз- рушения
20	3311	$5,36 \cdot 10^7$	-154 МПа, разруше- ние по входной кромке, по радиусу перехода к пера в полку
18	3502	$2,095 \cdot 10^7$	-141 МПа, без раз- рушения
18	3487	$2,109 \cdot 10^7$	-96 МПа, без раз- рушения
18	3473	$2,13 \cdot 10^7$	-154 МПа, без раз- рушения
18	3360	$2,16 \cdot 10^7$	-67 МПа, без раз- рушения
18	3517	$2,22 \cdot 10^7$	-176 МПа, без раз- рушения
18	3424	$2,07 \cdot 10^7$	-165 МПа, без раз- рушения
18	3426	$2,644 \cdot 10^7$	-88 МПа, без раз- рушения

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. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) - М.: МИСиС - 2001 - 632 с.
2. Мубояджан С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Обработка поверхности жаропрочных сплавов в плазме вакуумно-дугового разряда // Материалы 6-той Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками. ТПУ, Томск - 23-28 сентября – 2002. - С. 561-563.
3. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. GESA-1 and GESA-2 accelerators of intense pulsed electron beams // J. Vacuum – 2001. - Vol. 62. - P. 211-214.
4. Шулов В. А., Ночовная Н. А., Ремнев Г. Е., Полякова И. Г., Исаков. И. Ф. Способ ремонта деталей машин с помощью обработки их поверхности концентрированными импульсными потоками энергии // Патент РФ № 586735139. Бюл. №5 - 1997. - 12 с.
5. Технологические основы модифицирования поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойким NiCrAlY покрытием с применением сильноточных импульсных электронных пучков /А.Г.Пайкин, А.В.Крайников, В.А.Шулов, О.А.Быценко, В.И.Энгелько, К.И.Ткаченко, А.В.Чижирыка // Физика и химия обработки материалов – 2008. - №3. - С. 56-60.
6. Шулов В.А., Новиков А.С., Энгелько В.И. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения – М: Изд-во: ДИПАК – 2012. – 292 с.

APPLICATION OF INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS FOR REPAIR AND PROPERTY RECOVERY OF TURBINE BLADES WITH PERFORATE HOLES

A.N. Gromov¹⁾, V. A. Shulov²⁾, O. A. Bytsenko²⁾, D. A. Teryaev²⁾, A. D. Teryaev¹⁾, V. I. Engelko³⁾

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

It is shown that intense pulsed electron beam of microsecond duration is a high effective instrument for modification and repair of turbine blades with perforate holes without the decrease of fatigue strength.