

фактором является увеличение энергии упругой деформации решетки, а во втором – уменьшение межфазной энергии границы раздела карбид–расплав. Одновременное легирование карбида титана ванадием и вольфрамом вызывает своеобразный синергетический эффект – резкое повышение скорости перераспределения легирующих элементов в карбидной фазе, появление в ней в связи с этим избыточных пор и, как следствие, увеличение скорости растворения карбида в расплаве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кипарисов С. С., Левинский Ю. В., Петров А. П. Карбид титана: получение, свойства, применение. М.: Металлургия, 1987.
2. Lengauer W., Eder A. Carbides: Transition metal solid-state chemistry. Encyclopedia of inorganic chemistry. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

3. Durlu N. // J. Eur. Ceram. Soc. 1999. Vol. 19. P. 2415.
4. Bellosi A., Calzavarini R., Faga M.G. et al. // J. Mater. Proc. Technol. 2003. Vol. 143/144. P. 527.
5. Chun D. I., Kim D. Y., Eun K. Y. // J. Am. Ceram. Soc. 1993. Vol. 76, № 8. P. 2049.
6. Yanaba Y., Takahashi T., Hayashi K. A. // J. Jap. Soc. Powder and Powder Metall. 2004. Vol. 51, № 5. P. 374.
7. Moskowitz D., Plummer H. K. // Proc. Inter. Sci. Conf. on Hard Mater (N.Y. – London). 1983. P. 299.
8. Yoshimura H., Sugizawa T., Nishigaki K. et al. // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 1983. Vol. 2, № 4. P. 170.
9. Wally P., Binder S., Ettmayer P., Lengauer W. // J. Alloys Compd. 1995. Vol. 230, № 1. P. 53.
10. Жильев В. А., Федоренко В. В. // Тугоплавкие соединения. Киев: ИПМ АН УССР, 1981. С. 51.
11. Жильев В. А., Патраков Е. И. // Конструкции из композ. материалов. 2006. № 4. С. 199.
12. Жильев В. А. // Материаловедение. 2012. № 3. С. 3.
13. Heuer A. H., Sears J. S., Zaluzec N. J. // Proc. 2-nd Inter. Conf. Sci. on Hard Mater. (Bristol, Boston, A Hilger Ltd.). 1986. P. 321.
14. Пинес Б. Я., Сидоренко А. Ф. // Журн. техн. физики. 1958. Т. 28, № 8. С. 1748.

УДК 539.213.612.17.533

ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2014 г. В. А. Шулов, В. И. Энгелько, А. Н. Громов, Д. А. Теряев, О. А. Быценко, Г. Г. Ширваньянц

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)
Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург
ОАО «Московское машиностроительное предприятие им. В. В. Чернышева» (ММП)

Статья поступила в редакцию 13.05.2013 г., доработана 17.09.2013 г., подписана в печать 19.09.2013 г.

В. А. Шулов – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов МАИ (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4). Тел.: (499) 158-44-24. E-mail: shulovva@mail.ru.

В. И. Энгелько – зам. ген. директора НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова (189631, г. Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 1). Тел.: (812) 462-78-45. E-mail: engelko@niefa.spb.ru.

А. Н. Громов – техн. директор ОАО «ММП им. В. В. Чернышева» (125362, г. Москва, ул. Вишневая, 7). Тел.: (495) 491-56-22. E-mail: zavod@avia500.ru.

Д. А. Теряев – канд. техн. наук, ассистент той же кафедры МАИ. Тел.: (499) 158-44-24. E-mail: teryaev@mail.ru.

О. А. Быценко – канд. техн. наук, нач. лаборатории ОАО «ММП им. В. В. Чернышева». Тел.: (495) 491-57-56. E-mail: zavod@avia500.ru.

Г. Г. Ширваньянц – аспирант той же кафедры МАИ. Тел.: (499) 158-44-24. E-mail: shulovva@mail.ru.

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии режимов облучения высокоэнергетическими импульсными электронными пучками (СИЭП) на кинетику абляции поверхностных слоев лопаток компрессора из стали ЭП866Ш и защитного покрытия NiCrAlY на лопатках турбины газотурбинного двигателя из сплава ЖС26НК. Показано, что СИЭП микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта лопаток компрессора и турбины. Применение СИЭП позволяет удалять за один импульс поврежденные при эксплуатации поверхностные слои покрытий на лопатках турбины толщиной от 5 до 10 мкм при плотности энергии 50–55 Дж/см². Толщина удаляемых за импульс при плотности энергии 48–50 Дж/см² поверхностных слоев лопаток компрессора из стали ЭП866Ш составляет 7 мкм.

Ключевые слова: электронно-пучковая обработка, лопатки компрессора и турбины, сканирующая электронная микроскопия, восстановление свойств.

The experimental results concerning the effect of intense pulsed electron irradiation (IPEI) conditions on the ablation kinetics of the surface layers of compressor blades made of ЭП866Ш steel and gas turbine engine blades from ЖС26НК with NiCrAlY protective coating. IPEI of microsecond duration is shown to be high effective tool for repair of the compressor and turbine blades. Application of IPEI beam allows one to ablate per a pulse the surface layers, the thickness of which is 5–10 μm and which are fractured during the operation of turbine blades if the energy density is 50–55 J/cm^2 . The thickness of the ablated surface layers of compressor blades made of ЭП866Ш steel during a pulse at the energy density of 48–50 J/cm^2 is equal to 7 μm .

Key words: electron beam treatment, compressor and turbine blades, scanning electron microscopy, property recovery.

ВВЕДЕНИЕ

Ремонт и восстановление свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинных двигателей (ГТД) после эксплуатации является одной из важнейших задач авиационного двигателестроения [1]. Проведение ремонтно-восстановительных операций позволяет значительно повысить ресурс эксплуатации изделия, при этом обеспечивается существенная экономия дорогостоящих материалов и средств на изготовление новых лопаток. В то же время исследований, посвященных разработке технологических процессов ремонта и восстановления эксплуатационных свойств деталей машин, за последние 15 лет было проведено недостаточно для повышения эффективности этих процессов.

В авиадвигателестроении для удаления нагара и поврежденных при эксплуатации поверхностных слоев лопаток компрессора и турбины после длительной наработки было предложено три способа: травление в плазме вакуумно-дугового разряда, плазменно-электролитическое полирование и абляция материала поверхностных слоев при облучении концентрированными импульсными потоками энергии [2, 3]. При использовании первых двух способов скорость травления жаропрочных материалов достигает 10–15 $\text{мкм}/\text{ч}$ со всей поверхности пера и спинки лопаток при существенной неоднородности удаления материала с различных участков поверхности деталей сложной формы. Применение же мощных ионных пучков для удаления покрытий ZrN, NiCrAlY и TiSiB с поверхности лопаток из сплавов ВТ9, ЖС26НК и ВТ25У обеспечивает однородное распыление этих покрытий за счет абляции со скоростями 1,0; 0,4 и 0,04 $\text{мкм}/\text{имп}$. Поскольку скважность импульсов ионно-лучевых установок «Темп-1», на которых было проведено облучение в работе [3], равна 5 с, то за 1 ч обработки возможно удаление поверхностных слоев толщиной 700, 280 и 28 мкм с площади до 30 см^2 соответственно. По-

следнее свидетельствует о высокой перспективности реализации обработки концентрированными импульсными потоками энергии для ремонта лопаток компрессора и турбины с защитными покрытиями. Кроме мощных ионных пучков для этих целей могут быть использованы сильноточные импульсные электронные пучки (СИЭП), где механизмом удаления поверхностных слоев является абляция, протекающая за счет высокоскоростной термализации электронов.

В этой связи цель настоящей публикации – разработка технологических основ процессов восстановления эксплуатационных свойств (усталостная прочность, жаростойкость, сопротивление горячей солевой коррозии) лопаток компрессора из стали ЭП866Ш и никелевого сплава ЖС26НК с применением сильноточного импульсного электронного пучка, формируемого в ускорителях «Геза-1», «Геза-2» и «Геза-ММП».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ 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 Nb; 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 ч, охлаждение со скоростью 50–60 град/мин, стабилизирующий отжиг при 1000 °С в вакууме длительностью 2 ч) с покрытием СДП-2 (основа – Ni; 18–22 Cr, 11,0–13,5 Al, 0,3–0,6 Y) толщиной 60 мкм , нанесенным на установке МАП-1 по методике ВИАМ (г. Москва) [6].

Кроме того, были изучены лопатки компрессора двигателя РД-33 из стали ЭП866Ш ферритного класса с карбидным упрочнением (15X16K5H2MBФAB-ш по ТУ14-1-2756-79), химический состав и режимы термообработки которой были следующие: Fe; 1,7 Ni; 0,13 C; 15,0 Cr;

1,35 Mo; 4,5 Co; 0,6 Mn; 0,18 V; 0,2 Nb; 0,6 Si; 0,03 N; 0,02 S; 0,03 P; 0,65 W; закалка в струе аргона от 1100 °С; отпуск при 700 °С в течение 2,5 ч; отпуск при 650 °С, 2,5 ч. Технологический процесс изготовления лопаток компрессора из этой стали хорошо освоен в ОАО «ММП им. В. В. Чернышева» (г. Москва) и включает 50 операций, основными из которых являются штамповка, фрезерование, вальцевание, шлифование, полирование, термообработка, виброшлифование и виброглянцева-ние. Выпускаемые по данной технологии лопатки полностью удовлетворяют требованиям разработчика и обеспечивают ресурс их эксплуатации в составе двигателя РД-33 в течение более 1000 ч при температурах до 600 °С.

В настоящей работе исследовались лопатки, прошедшие наработку в течение 260 ч. Толщина слоя нагара на различных участках их поверхности изменялась от 40 до 80 мкм. В состав сформированного при эксплуатации нагара, согласно результатам проведенного рентгеновского фазового анализа, входили углеводороды, шпинели, сульфаты, сульфиты и оксиды, прежде всего хрома и железа. Кроме того, необходимо отметить присутствие на поверхности большого числа лопаток крупных забоин. Эта часть лопаток не подлежала ремонту по геометрическим соображениям, поэтому именно на них и были выполнены эксперименты по изучению кинетики удаления нагара и лежащих под ним окисленных поверхностных слоев толщиной до 20 мкм, содержащих Cr_2O_3 , Fe_2O_3 и FeCr_2O_4 .

Часть лопаток до облучения разрезали на электроэрозионном станке и исследовали методами электронной Оже-спектроскопии, сканирующей

Таблица 1. Влияние плотности энергии в импульсе и числа импульсов на шероховатость поверхности, экзoeлектронную эмиссию, остаточные напряжения и микротвердость вакуумно-плазменного покрытия NiCrAlY, осажденного на поверхности образцов из жаропрочных сплавов ЖС32ВИ и ЖС26НК

w , Дж/см ²	n , имп.	R_a , мкм (±0,05)	I_{eee} , имп./с	σ , МПа (±50)	H_v , ед. HV ($P = 2$ Н)
–	–	2,12	240±60	–170	420–490
22–26	5	1,14	390±90	+120	440–520
22–26	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

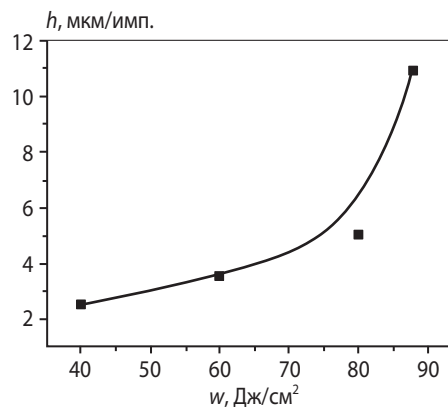


Рис. 1. Кинетика удаления покрытия СДП-2 с поверхности лопаток из сплава ЖС26НК при СИЭП-облучении
 h – толщина удаленного за 1 импульс слоя

электронной спектроскопии, рентгеноструктурного анализа и оптической металлографии. Кроме этого, измеряли микротвердость (H_v) и шероховатость (R_a). Обработку лопаток СИЭП проводили на ускорителях «Геза-1», «Геза-2» и «Геза-ММП» (энергия электронов 115–125 кэВ; длительность импульса 30–80 мкс; плотность энергии в пучке 20–90 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка 30–80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка 5 %).

Лопатки после облучения также разрезали, а из полученных образцов-свидетелей изготавливали поперечные шлифы, в результате был установлен удельный унос вещества в зависимости от плотности энергии и числа импульсов. Кроме того, поверхность мишеней исследовали вышеперечисленными методами для определения толщин удаленных за 1 импульс слоев и физико-химического состояния перекристаллизованной и модифицированной областей мишени. Наконец были реализованы сравнительные усталостные и коррозионные испытания серийных лопаток, а также лопаток, подвергнутых ремонту по серийной технологии и с применением СИЭП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Некоторые результаты исследования облученных лопаток из никелевых сплавов представлены на рис. 1–4 и в табл. 1, из которых следует, что уже при плотностях энергии в импульсе $w \geq 60$ Дж/см² на поверхности облучаемых деталей из сплава

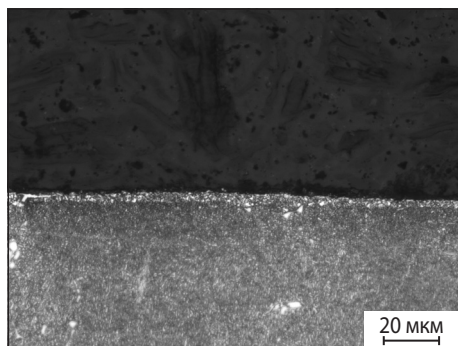


Рис. 2. Микроструктура в поверхностном слое образца с покрытием СДП-2 толщиной 60 мкм после его частичного удаления при $w = 40$ Дж/см² и $n = 1$ имп.

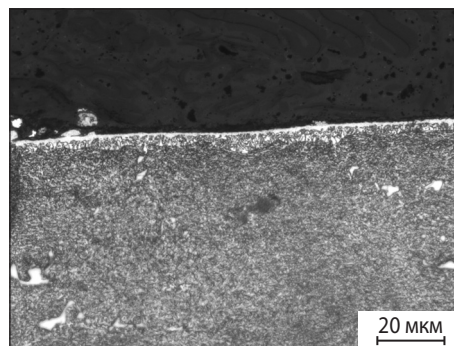


Рис. 3. Микроструктура в поверхностном слое образца с покрытием СДП-2 толщиной 60 мкм после его полного удаления при $w = 55$ Дж/см² и $n = 10$ имп.

ЖС26НК начинают интенсивно протекать процессы удаления поверхностных загрязнений и слоев покрытия. Облучение же с большими значениями плотности энергии приводит к полному удалению покрытия СДП-2 за 10 импульсов, однако микрорельеф формируемой поверхности в этом случае имеет волнистый характер и для его выглаживания необходимо проводить повторное облучение в режиме плавления.

Несомненный практический интерес, как и в работах [2–5], представляет собой явление абляции – релаксационного взрывоэмиссионного процесса образования неравновесной пароплазменной фазы, содержащей капельную фракцию. Реализация этого процесса удаления материала с поверхности детали по взрывному механизму на макроуровне открывает широкие возможности для ремонта дорогостоящих компонентов ГТД. На рис. 1 приведены результаты исследования кинетики абляции с поверхности лопаток 1-й ступени турбины высокого давления (ТВД) двигателя РД-33 с покрытием СДП-2. Поскольку поверхность после протекания процесса абляции содержит большое число кратеров и имеет волнистый микрорельеф, необходимо проводить финишную электронно-лучевую обработку при более низких плотностях энергии для снижения шероховатости поверхности на ускорителях «Геза-1», «Геза-2» и «Геза-ММП».

После электронно-лучевого удаления выработавшего ресурс покрытия и поверхностного выглаживания поверхности лопатки должна быть осуществлена финишная термообработка для снятия остаточных растягивающих напряжений, стабилизации структурно-фазового состояния и нанесения нового покрытия.

В качестве примера в заключении статьи приведен электронно-лучевой технологический процесс ремонта поверхности лопаток 1-й ступени ТВД РД-33. Один из важнейших вопросов, который возникает при реализации этого процесса, – как добиться неадекватного уноса материала с различных участков поверхности лопатки? Действительно, после эксплуатации толщины оставшегося покрытия и окисленных слоев сильно различаются в разных участках поверхности лопатки, поэтому при облучении одинаковым числом импульсов частично будет удаляться и собственно жаропрочный сплав. Однако этот вопрос решается простым подбором величины плотности энергии в импульсе, обеспечивающей эффективный унос материала покрытия, но не достигающей значений, при которых материал лопатки

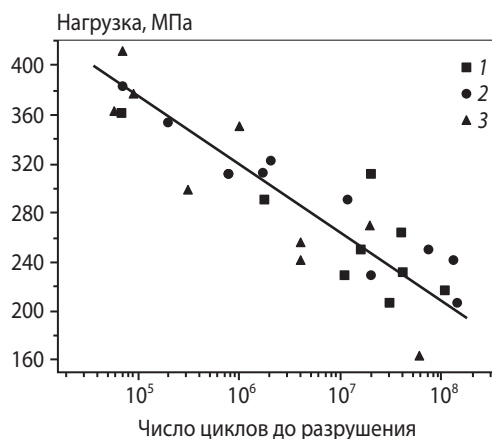


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний цилиндрических образцов из сплава ЖС26НК с покрытием СДП-2

- 1 – образцы с покрытием СДП-2
- 2 – после обработки электронным пучком
- 3 – после ремонта

подвержен абляции. Последнего добиться достаточно легко, так как жаропрочный сплав отличается незначительным числом пор и большим содержанием тугоплавких элементов по сравнению с покрытием СДП-2.

В этой связи становится очевидным, что величины плотностей энергии, при которых интенсивно протекает абляция материала покрытия СДП-2 и жаропрочного никелевого сплава, будут сильно различаться. На рис. 2 и 3 иллюстрируются результаты удаления покрытия СДП-2 толщиной 60 мкм электронным пучком на ускорителе «Гега-2» с поверхности специально приготовленных монокристаллических образцов из сплава ЖС26НК. На рис. 2 представлен случай частичного удаления покрытия, видны перекристаллизованный слой и оставшееся покрытие толщиной ~ 20 мкм. На рис. 3 покрытие полностью удалено, отчетливо просматривается область перекристаллизованного материала. Энергия электронов при облучении составляла 125 кэВ, а длительность импульса менялась с повышением плотности энергии от 30 мкс ($w = 40 \text{ Дж/см}^2$) до 80 мкс ($w = 70 \text{ Дж/см}^2$). Изменять плотность энергии можно фокусировкой пучка или варьированием длительности импульса, что и было выполнено в данной работе из-за большей простоты последней методики. Из табл. 1 следует, что при реализации электронно-лучевого процесса ремонта наблюдается снижение шероховатости (выглаживание) поверхности за счет плавления и увеличения интенсивности экзоэлектронной эмиссии, что объясняется просто очисткой поверхности при облучении. Микротвердость и остаточные напряжения практически не меняются.

Разработанный технологический процесс ремонта деталей из жаропрочных никелевых спла-

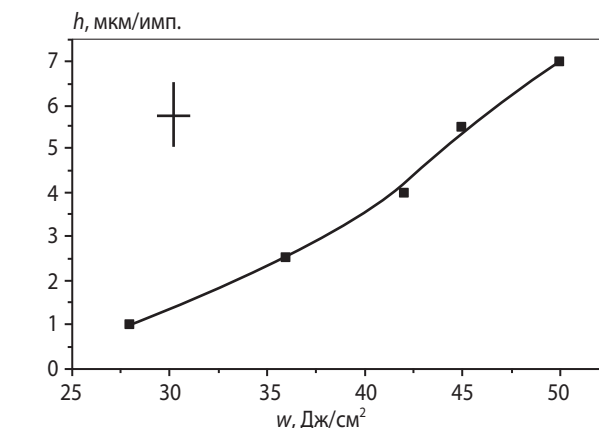


Рис. 6. Кинетика абляции с поверхности лопаток компрессора из стали ЭП866Ш

вов был апробирован на цилиндрических усталостных образцах из монокристаллического сплава ЖС26НК. На их поверхность по технологии ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» было нанесено покрытие СДП-2 толщиной 60 мкм. После этого покрытие удалялось согласно технологическому процессу, описанному далее в заключении, и наносилось новое покрытие. Полученная таким образом партия образцов испытывалась на усталость при $t = 975 \text{ }^\circ\text{C}$ и частоте нагружения 3000 Гц на воздухе. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследования кинетики абляции с поверхности никелевых сплавов, а также с данными, полученными Ю. Д. Ягодкиным при использовании низкоэнергетического ускорителя, разработанного и изготовленного в Институте сильноточной электроники РАН (г. Томск) [6].

Результаты исследования и испытаний исходных и облученных лопаток из стали ЭП866Ш приведены на рис. 5–7 и в табл. 2. Внешний вид ло-

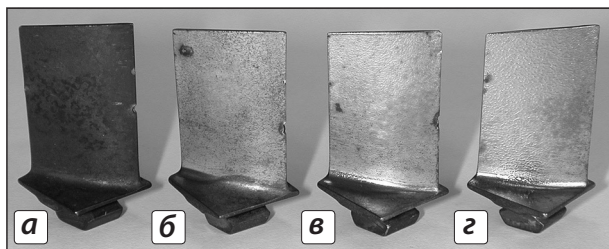


Рис. 5. Внешний вид лопаток из стали ЭП866Ш после эксплуатации в течение 260 ч на двигателе РД-33
а – исходная лопатка после наработки
б–г – лопатки после облучения на ускорителе «Гега-1» при $n = 2$ имп. и $w = 20 \div 22$ (**б**), $26 \div 28$ (**в**) и $32 \div 36$ (**г**) Дж/см²



Рис. 7. Морфология поверхности лопаток из стали ЭП866Ш после эксплуатации на двигателе РД-33 и облучения на ускорителе «Гега-1» с $w = 50 \div 55 \text{ Дж/см}^2$ и $n = 4$ имп.

Таблица 2. Влияние электронно-лучевой обработки на физико-химическое состояние материала в поверхностных слоях и свойства лопаток КВД из стали ЭП866Ш

Состояние материала	w , Дж/см ²	n , имп.	R_a , мкм ±0,01	H_v , ед. HV ($P = 1$ Н) ±30	σ_{-1} , 10 ³ Па ±20	h_0 , мкм ±5	m/S , мг/мм ² ±0,03
1	–	–	0,24	410	380	45	1,98
2	–	–	1,25	690	290	65	–
3	20–22	2	0,32	470	310	50	2,12
4	50–55 20–22	4 2	0,22	430	420	15	0,38
5	–	–	0,25	400	360	45	2,01

Примечание. σ_{-1} – предел выносливости при $t = 600$ °С, частоте нагружения 3000 Гц на базе $2 \cdot 10^7$ циклов; h_0 – толщина окисленного слоя после термоэкспозиции в течение 600 ч на воздухе при $t = 600$ °С; m/S – удельный привес образцов после 200 циклов нагрева до 600 °С и охлаждения в морской воде до 20 °С. Состояние материала: **1** – исходное; **2** – после эксплуатации; **3** – после эксплуатации и обработки СИЭП; **4** – после эксплуатации, обработки СИЭП и отжига при 670 °С в течение 6 ч; **5** – после ремонта по серийной технологии.

паток 7-й ступени ротора компрессора высокого давления (КВД) ГТД из стали ЭП866Ш, прошедших наработку на двигателе в течение 260 ч и облученных на ускорителе при $w = 20 \div 22$, $26 \div 28$ и $31 \div 36$ Дж/см² и $n = 2$ имп., представлен на рис. 5. Видно, что некоторые лопатки имеют следы механических повреждений (забоины, вмятины, микротрещины). Отдельные детали не подлежали ремонту по геометрическим требованиям. После облучения при $w = 20 \div 22$ Дж/см² и $n = 2$ имп. удается практически полностью удалить нагар с поверхности лопаток. Для полного удаления оксидных слоев было проведено облучение при более высоких плотностях энергии, в частности $w = 50 \div 55$ Дж/см², и $n = 4$ имп. (рис. 6).

Поскольку в этом случае на поверхности ремонтируемых лопаток образовались отдельные кратеры (рис. 7), для их удаления было реализовано облучение при небольших плотностях энергии в режиме плавления ($w = 20 \div 22$ Дж/см²) и $n = 4$ имп. После этого был проведен вакуумный стабилизирующий отжиг при $t = 670 \pm 30$ °С в течение 2–6 ч для снятия остаточных растягивающих напряжений.

К сожалению, исходя из данных рис. 6, не удается выбрать число импульсов, достаточное для полного удаления газонасыщенных при эксплуатации поверхностных слоев лопаток из стали ЭП866Ш, поскольку для различных двигателей отличаются и условия наработки, и ее продолжительность, а значит, толщина этих слоев может существенно меняться. Поэтому перед операцией ремонта должна быть выполнена операция контроля толщины поврежденного при эксплуатации слоя, а также его состава, и только после этого можно выбирать необходимое для полного

удаления окисленных слоев число импульсов, согласно рис. 6.

В качестве примера в заключении приведено описание электронно-лучевого технологического процесса ремонта лопаток 1-й ступени ротора турбины двигателя РД-33. Для реализации этого процесса была спроектирована и изготовлена промышленная установка «Геза-ММП». Импульсный ускоритель «Геза-ММП» предназначен для электронно-лучевой обработки поверхности лопаток компрессора и турбины ГТД с целью повышения целого комплекса эксплуатационных свойств этих деталей, продолжительность эксплуатации которых, чаще всего, определяет ресурс всего изделия.

Ускоритель «Геза-ММП» снабжен форвакуумным и диффузионным насосами, а кроме того, предусмотрено подключение турбомолекулярного насоса, которые обеспечивают выход на вакуум (10^{-6} мм рт. ст.) в течение 10 мин. В состав установки также входят: электронный инжектор с многоострийным взрывоэмиссионным катодом (предусмотрены быстрая замена катодов при переходе на облучение лопаток различных ступеней); камера транспортировки пучка; магнитная фокусирующая система; высоковольтный генератор; радиационная защита; стойка управления; пульт контроля, обеспечивающий фиксацию вольт-амперных характеристик и их компьютерный анализ; узел для помещения, закрепления, транспортировки, непрерывного и дискретного вращения лопаток. Комплект загружаемых лопаток составляет 40 ед. Технические характеристики установки «Геза-ММП» могут варьироваться в следующих диапазонах: ускоряющее напряжение 50–120 кВ; плотность тока на мишени 5–30 А/см²; длительность импульса

1–40 мкс; диаметр пучка 6–10 см; неоднородность распределения плотности энергии в импульсе по сечению пучка – не выше 5 % (для лопаток из стали ЭП866Ш требуется $w = 20 \div 22$ Дж/см²).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что сильнооточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойкими покрытиями. Применение СИЭП позволяет удалять за один импульс поврежденные при эксплуатации поверхностные слои лопаток из стали ЭП866Ш толщиной от 5 до 10 мкм при плотности энергии 50–55 Дж/см².

Экспериментально доказано, что после электронно-лучевого удаления с поверхности лопаток 1-й ступени ТВД РД-33 поврежденного во время эксплуатации покрытия СДП-2 основные свойства лопаток ухудшаются – возрастает шероховатость поверхности, снижается предел выносливости, формируются остаточные растягивающие напряжения. Для достижения уровня эксплуатационных свойств исходных лопаток необходимо осуществлять технологический процесс ремонта лопаток в несколько операций:

005 – удаление покрытия; 010 – выглаживание микрорельефа; 015 – контроль состояния поверхности; 020 – финишная термообработка для снятия

остаточных растягивающих напряжений; 025 – нанесение нового покрытия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 11-08-00672-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение. 1988.
2. Пайкин А. Г., Львов А. Ф., Шулов В. А. и др. // Пробл. машиностроения и автоматизации. 2003. № 3. С. 41.
3. Белов А. Б., Крайников А. В., Львов А. Ф. и др. // Двигатель. 2006. № 1. С. 6.
4. Белов А. Б., Крайников А. В., Львов А. Ф. и др. // Там же. № 2. С. 8.
5. Новиков А. С., Шулов В. А., Энгелько В. И. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения. М.: Изд-во «ДИПАК», 2012.
6. Окс Е. М. Источники электронов с плазменным катодом (Физика. Техника. Применения). Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
7. Ягодкин Ю. Д. Разработка технологических основ процессов обработки деталей ГТД с применением ионных и электронных пучков: Дис. ... докт. техн. наук. М.: МАИ, 1995.
8. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (Сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001.
9. Мубояджан С. А., Будиновский С. А., Помелов Я. А. // Матер. 6-й Междунар. конф. по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (Томск, 23–28 сент. 2002 г.). Томск, ТПУ, 2002. С. 561.
10. Смыслов А. М., Лизунов В. П., Гребенюк Г. П. // Авиац. пром-сть. 1992. № 12. С. 50.
11. Пат. 586735139 (РФ). Способ восстановления эксплуатационных свойств деталей машин / В. А. Шулов, Н. А. Ночовная, Г. Е. Ремнев и др. 1997.

УДК 621.9.048.7

ПРОЦЕСС СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ПОКРЫТИЯХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

© 2014 г. **А. В. Долговечный, Л. А. Демидова, А. М. Ханов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 22.10.2012 г., доработана 30.04.2013 г., подписана в печать 07.05.2013 г.

А. В. Долговечный – ассистент кафедры конструирования машин и технологии обработки материалов ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 6). E-mail: eternal85@bk.ru.

Л. А. Демидова – канд. техн. наук, вед. технолог той же кафедры. E-mail: lab@pstu.ru.

А. М. Ханов – докт. техн. наук, проф., декан механико-технологического факультета ПНИПУ. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru.

Изучены процессы структурообразования в поверхностном слое стали 20 в результате лазерной наплавки стали марки Н13 (аналог 4Х5МФ1С), которую осуществляли на установке LENS 850-R с лазером мощностью 1 кВт по нескольким типичным схемам. Исследовано влияние технологии наплавки на формирование неоднородной структуры и твердости по слоям наплавки. Проведены металлографический, спектральный и рентгеноструктурный анализы. Показано значительное изменение химического состава слоев по сравнению с химическим составом