

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИНЖЕНЕРИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

В.А. Шулов¹⁾, Н.А. Ночовная²⁾, В.И. Энгелько³⁾, А.Г. Пайкин⁴⁾, А.Ф. Львов⁴⁾, М.В. Виноградов⁴⁾

¹⁾ Московский авиационный институт, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе 4, Россия; Тел.: (7-095) 1584424, Факс: (7-095) 1582977, E-mail: shulovva@mail.ru

²⁾ Всероссийский институт авиационных материалов, 107005, Москва, ул. Радио 17, Россия; Тел.: (7-095) 2638567, Факс: (7-095) 2678609, E-mail: vashulov@mtu-net.ru

³⁾ НИИ электро-физической аппаратуры имени Д.В. Ефремова, 189631, Санкт-Петербург, Металлострой, Советский проспект 1, Россия; Тел.: (7-812) 4627845, Факс: (7-812) 4639812, E-mail: engelko@sirius.niiefa.spb.ru

⁴⁾ ММП имени В.В. Чернышева, 123362 Москва, А-80, ГСП-7, Вишневая ул. 7, Россия; Тел.: (7-095) 4914988, Факс: (7-095) 491565

Проанализированы последние экспериментальные данные о влиянии облучения сильноточными электронными пучками микросекундной длительности на состояние поверхности и эксплуатационные свойства лопаток ГТД из жаропрочных титановых (ВТ6 и ВТ8М) и никелевых сплавов (ЖС6У и ЖС26НК). Основное внимание сконцентрировано на рассмотрении причин изменения свойств лопаток и модельных образцов в результате электронно-лучевой обработки реализованной на ускорителе ГЕЗА-1. Показано, что облучение сильноточными импульсными электронными пучками по оптимальным режимам, а также финишная термическая или термомеханическая обработка обеспечивают кардинальное повышение усталостных и коррозионных свойств этих, наиболее ответственных деталей ГТД.

Введение

В последнее время особое внимание уделяется разработке новых и модернизации уже известных методов поверхностной инженерии деталей машиностроения широкой номенклатуры, что сопровождается предельно быстрым внедрением созданных техпроцессов в промышленность. Эта тенденция была озвучена на экспертном совещании ведущих специалистов Европейского Сообщества, которое проводилось во Франции в октябре 2001 года [1]. Результаты экспертных оценок по прогнозированию объема выпуска машиностроительной продукции с применением методов поверхностной инженерии (электролитические покрытия, композиционные покрытия, поверхностное легирование, лазерная обработка, катодное распыление, химико-термическая обработка, химическое и физическое осаждение из пара, обработка ионными и электронными пучками), сделанных 62 экспертами [1], позволяют прийти к заключению о приоритетности химико-термической обработки, включая обработку мощными ионными и сильноточными электронными пучками. Только для этих технологий общий объем продукции в 2010 году составит более 420 М€, что превысит объемы производства деталей с применением химического и физического осаждения из пара (250 М€), электролитического плакирования (400 М€), нанесения композиционных покрытий (30 М€), и только применение метода распыления в поверхностной инженерии машиностроительной продукции ожидается в больших объемах (500 М€). Среди же отраслей машиностроения к 2000 году наиболее широкое использование ионно- и электронно-лучевых технологий, а также технологий поверхностного легирования было отмечено в автомобильной промышленности (1 место), общем машиностроении (2 место),

авиационной и космической технике (3 место), причем прогноз на 2010 год оставил все практически без изменений. То, что мощные ионные и электронные импульсные пучки, а также лазерное излучение являются одними из наиболее эффективных инструментов для поверхностной инженерии деталей автомобилестроения, авиационной и космической техники обусловлено не только возможностями этих методов воздействия на материалы, но и достигнутым уровнем развития оборудования для их реализации. Целью настоящей работы является демонстрация возможностей использования сильноточных импульсных электронных пучков для поверхностной инженерии деталей авиационного двигателя при реализации облучения на установке Геца-1[2], разработанной в НИИЭФА имени Д.В. Ефремова.

Материалы, оборудование и методики исследования

В качестве источника электронов в ускорителе "Геца-1" используется многоточечный взрывоземиссионный катод со стабилизированной катодной плазмой. Площадь поверхности эмиссии составляет 700 см². Ускоритель "Геца-1", в отличие от разработанных ранее установок, позволяет достичь больших значений энергии и длительности импульса при существенном увеличении расстояния от мишени до анода: энергия электронов - 40-150 кэВ; длительность импульса - 5-40 мкс; плотность энергии в пучке - 1-50 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка - 30-80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка - 5-10 %; КПД передачи запасенной в накопителе энергии в энергию пучка - 45 - 50 %. В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались образцы и лопатки компрессора и турбины из сплавов ВТ6

(Ti6Al4V), BT8M, ЖС6У и ЖС26НК. Составы сплавов и режимы термообработки соответствовали ТУ [3, 4]. Образцы и лопатки разрезались на электроэрозионном станке и исследовались методами: электронной Оже-спектроскопии (ЭОС), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеноструктурного анализа (РСА) и оптической металлографии в поляризованном свете. Испытания образцов, моделирующих лопатки компрессора из сплавов BT6 и BT8M проводились на воздухе при температуре эксплуатации (450°C) при высокочастотном (3000 Гц) нагружении. После завершения испытаний проводился фрактографический анализ поверхностей усталостных изломов исходных и облученных образцов (СЭМ). Испытания на жаростойкость проводились на образцах-цилиндрах, помещенных в муфельную печь и выдерживаемых при температуре 900°C (ЖС26НК с 50-микронным покрытием СДП-2, полученным вакуумно-дуговым методом на установке МАП-1) в течение 500 часов на воздухе. Сопротивление окислению определялось по изменению массы образцов ($\Delta m/S_0$, мг/мм²) при различных временах термоэкспозиции: 100, 200, 300, 400 и 500 часов.

Экспериментальные данные и их обсуждение

В соответствии с результатами расчетов, проведенных в [3, 4], облучение проводилось на ускорителе «Геза-1» при энергии - 100-130 кэВ и длительности импульса - 15-30 нс. При этом плотность энергии и число импульсов варьировались в пределах - $w=18-55$ Дж/см² и $n=1-10$ имп. Влияние плотности энергии и числа импульсов на химический состав поверхностных слоев лопаток ГТД исследовалось методом ЭОС. Частично эти результаты опубликованы в [3, 4]. Анализируя результаты исследования влияния облучения и последующего отжига на химический состав приповерхностных слоев изучаемых сплавов, можно сделать вывод о том, что: облучение при $w=18-22$ Дж/см² и диффузионный отжиг приводят к увеличению содержания алюминия в поверхностных слоях титановых сплавов и хрома в никелевых сплавах, а также к более однородному распределению элементов по глубине и очистке поверхности от примесей углерода и кислорода. Это должно обеспечить повышение основных служебных свойств лопаток ГТД, прежде всего, сопротивления окислению и солевой коррозии, а также (в меньшей степени) усталостной прочности. Результаты металлографического анализа исходных и облученных мишеней свидетельствуют о формировании в процессе высокоскоростной кристаллизации плохо травящегося поверхностного слоя толщиной 20-25 мкм. При этом с ростом плотности энергии в импульсе и числа импульсов изменяется морфология поверхности. Влияние режимов облучения СЭИП на топографию поверхности лопаток из сплава

ЖС26НК с покрытием СДП-2 была изучена в [3, 4] с целью выбора оптимальных величин плотности энергии, обеспечивающих достижение минимального уровня шероховатости и определения бескратерных режимов облучения. С этой точки зрения, наиболее приемлемым является облучение импульсным электронным пучком при следующих величинах плотности энергии в импульсе: титановые сплавы - 18-20 Дж/см²; никелевые сплавы с покрытием СДП-2 - 40-42 Дж/см². При этих значениях параметров облучения формируется поверхность, не содержащая кратеров и микротрещин. Здесь следует отметить, что наличие микротрещин на поверхности покрытия СДП-2 после облучения может быть связано с его плохой адгезией при нанесении и диффузионном вакуумном отжиге. В этой связи, электронно-лучевая обработка, помимо модификации материала в поверхностных слоях, может быть использована как средство контроля адгезии покрытия к подложке (рис. 1). Результаты рентгеноструктурного анализа, проведенного для исходных, облученных и термообработанных деталей, позволяют сделать следующие заключения [3, 4]. Небольшие остаточные растягивающие напряжения ($\sigma=500-100$ МПа) формируются в поверхностных слоях мишеней, обработанных СИЭП при общей толщине модифицированного слоя 20-25 мкм. В этой приповерхностной зоне, в процессе высокоскоростной кристаллизации, образуются мартенситные фазы и мелкодисперсные конгломераты карбидов (или оксикарбидов). Финишная термообработка облученных лопаток при температуре их эксплуатации приводит к полному (или частичному) снятию растягивающих и формированию небольших сжимающих напряжений ($\sigma=100$ МПа), а также к распаду мартенситных фаз, коагуляции карбидов и росту зерна в приповерхностной области. Очевидно, что такие существенные вариации физико-химического состояния поверхностных слоев лопаток ГТД, в результате их облучения СИЭП, должны привести к значительным изменениям свойств этих деталей.

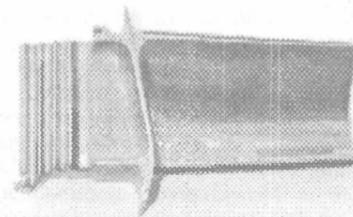


Рис.1. Внешний вид участка поверхности лопатки из сплава ЖС26НК со 100-микронным покрытием NiCrAlY после облучения СИЭП при $E=115-120$ кэВ, $w=42$ Дж/см², $\tau=25$ нс, $n=3$ имп

Результаты усталостных испытаний модельных образцов из сплавов BT8M и ЖС26НК приведены в [3], а из сплава BT6 - на рис. 2. Из этих данных следует, что применение СИЭП позволяет на несколько десятков процентов повысить предел

выносливости деталей из жаропрочных сплавов, причем, согласно экспериментальным данным о влиянии электронно-лучевой обработки на физико-химическое состояние поверхностных слоев, причинами повышения усталостной прочности являются снижение шероховатости поверхности, повышение однородности распределения элементов по глубине, снижение пористости материала поверхностного слоя, залечивание поверхностных микротрещин и наведение остаточных сжимающих напряжений. Это проявляется в изменении местоположения очага разрушения с поверхностного (для исходных образцов), на подповерхностное (для облученных мишеней). В ряде случаев для облученных образцов наблюдается снижение шага усталостных бороздок.

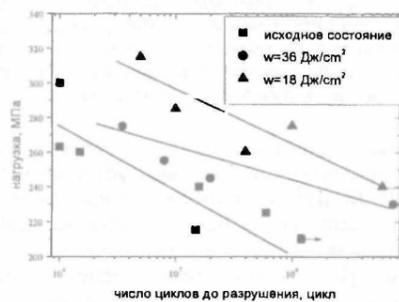


Рис. 2. Усталостные кривые, полученные для исходных и облученных образцов из сплава ВТ6

Это обусловлено технологией получения деталей из жаропрочных никелевых сплавов (направленная кристаллизация и двух ступенчатая термообработка на χ^* -фазу), которые значительно менее чувствительны к поверхностным дефектам по сравнению с титаном. Результаты испытаний на жаростойкость исходных и облученных СИЭП образцов из сплава ЖС26НК с 50-микронным покрытием СДП-2 показали, что после термоэкспозиции в течение 500 часов при 900°C удается зафиксировать весовым методом более

чем 2-х кратное повышение жаростойкости обработанных электронным пучком мишеней. Поперечные микрошлифы исходных и облученных образцов прошедших испытания, а также результаты рентгеноструктурного анализа [4] свидетельствуют о формировании при облучении в поверхностном слое β -фазы на основе NiAl, наличие которой приводит к повышению жаростойкости.

Заключение

Приведенные результаты, несмотря на их ограниченность, свидетельствуют о высокой перспективности использования сильноточных импульсных электронных пучков в авиационном двигателестроении. Применение таких пучков позволит: исключить операции шлифования и полирования, снизить шероховатость поверхности, упрочнить поверхностные слои, улучшить адгезию защитных покрытий к подложке и кардинально повысить усталостную прочность и коррозионную стойкость деталей. Эти применения СИЭП предполагают реализацию облучения при умеренных величинах плотности энергии в импульсе ($w=18-22$ Дж/см² для титановых сплавов и $w=40-42$ Дж/см² для никелевых сплавов).

Работа выполнена при финансовой поддержке ММП им. В.В. Чернышева, Минобразования РФ (грант № Т02-06.8-259) и МНТЦ (грант № 975.2).

Список литературы

1. Prospective survey of surface hardening technologies. - CETIM, Senlis, 16 October 2001. - 28 p.
2. Engelko V., Mueller G., Yatsenko // J. Vacuum. - 2001. - V. 62. - P. 211.
3. Виноградов М. В., Львов А. Ф., Шулов В. А., Ночовная Н. А. // Проблемы машиностроения и автоматизации - 2001. - № 1. - С. 91.
4. Shulov V.A., Nochovnaya N.A., Engelko V.I., Mueller G., Vinogradov M.V., Lvov A.F. // Proceedings of 9-th International Conference on Titanium. - St.-Peterburg. - 1999. - V. 3. - P. 2171.

SURFACE ENGINEERING TECHNOLOGIES OF REFRACTORY ALLOY COMPONENTS WITH INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS

V.A.Shulov¹⁾, N.A.Nochovnaya²⁾, V.I.Engelko³⁾, A.G.Paykin⁴⁾, A.F.Lvov⁴⁾, M.V.Vinogradov⁴⁾

¹⁾Moscow Aviation Institute, Volokolamskoye chosse 4, Moscow 125871, A-80, GSP-3, Russia, Tel.: (7-095) 1584424, Fax: (7-095) 1582977, E-mail: shulovva@mail.ru

²⁾All-Russian Institute of Aviation Materials, Radio Street 17, Moscow 107005, Russia, Tel.: (7-095) 2638833, Fax: (7-095) 2678609, E-mail: vashulov@mtu-net.ru

³⁾Efremov Institute of Electro-physical Apparatus, 1 Sovietsky Avenue, Metallostroy, St. Peterburg 189631, Russia; Tel.: (7-812) 4627845, Fax: (7-812)4639812, E-mail: engelko@sirius.niiefa.spb.ru

⁴⁾Chernyshev Machine Building Enterprise, 7 Vishnevaya Street, A-80, GSP-3, Moscow 123362, Russia, Tel.: (7-095) 4914988, Fax: (7-095) 4915652

The present paper reviews the results of investigations dedicated by the application of intense pulsed electron beams for surface processing of compressor and turbine blades of aircraft engines. The high energy density ($w=1-50$ J/cm²) of these short-pulsed ($\tau=1-20$ μ s) beams (with a diameter of $d=6-10$ cm and an energy of $E=100-150$ keV) exhibits a good prospect of their introduction into aircraft engine building for surface smoothing and strengthening of compressor and turbine blades from titanium and nickel alloys.