

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЛОКАЛЬНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

© 2018

Л. В. Денисов старший преподаватель кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
gx700fl@mail.ru

А. Г. Бойцов доктор технических наук, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
agboytsov@mail.ru

М. В. Силуянова доктор технических наук, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
dc2mati@yandex.ru

Рассматриваются вопросы поверхностного упрочнения зеркала гидроцилиндров авиационной техники из титановых сплавов методом электроискрового легирования разрядами малой энергии. Для обеспечения функциональных свойств поверхностного слоя зеркала применялись легирующие электроды из графита. Образующийся карбооксидный слой представляет собой мелкодисперсную структуру сложного состава (карбиды, оксиды титана, включения графита) толщиной 3...10 мкм с высокими твердостью и антифрикционными свойствами. Легирование графитовыми электродами практически не изменяет размеры деталей. Последующее выглаживание упрочненных поверхностей снижает величину коэффициента трения, шероховатость поверхности. Залечивание микротрещин и других дефектов повышает усталостную прочность изделия. Разработанная технология позволяет обеспечить комплекс свойств, предъявляемых к рабочим поверхностям гидроцилиндров и увеличить их ресурс.

Гидроцилиндр; титановый сплав; упрочнение; электроискровое легирование; карбооксидирование; алмазное выглаживание.

Цитирование: Денисов Л.В., Бойцов А.Г., Силуянова М.В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей и узлов газотурбинного двигателя локальным поверхностным легированием // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 58-67. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-58-67

Введение

Ответственные узлы и детали двигателя в процессе эксплуатации испытывают высокие нагрузки силового и температурного характера, которые, в совокупности с переменными и сложными условиями работы, становятся факторами разрушающего воздействия.

Одной из групп таких узлов являются гидроцилиндры, изготавливаемые для снижения массы из титановых сплавов. Они обеспечивают несколько функций, в частности, управление положением и сечением реактивного сопла, статорными поворотными лопатками. При эксплуатации на шток гидроцилиндра воздействуют осевые и радиальные силы, а также вибрационные нагрузки, вызывающие фреттинг-износ. Это приводит к износу и разрушению поверхности зеркала цилиндра при эксплуатации (наиболее интенсивно в крайних рабочих положениях штока), что вызывает нарушение герметичности. Сложная шарнирно-телескопическая связь гидроцилиндров и их штоков через тра-

версы и рычажные механизмы с подвижными частями реактивного сопла (внешними створками, проставками, надстворками) приводит к изгибающим моментам в системе гильза – шток. Имеется опасность смятия резиновых и фторопластовых уплотнений и прямого контакта поверхностей зеркала цилиндра и штока. Разрушается антифрикционное покрытие, узел разгерметизируется, а затем заклинивает. Продукты износа могут попадать в гидросистему, приводить к интенсификации износа топливорегулирующей аппаратуры и засорению фильтрующих элементов топливного насоса. Скорость перемещения поршня в гидроцилиндре может достигать 0,6 м/с, при этом количество переключений (рабочих ходов поршня) за ресурс может достигать 20 000. Уплотнения обеспечивают надёжную работу узла в течение 1200 часов, после чего необходима замена и ремонт в заводских условиях. Ресурс работы узла должен быть доведён до межремонтного ресурса двигателя. Одним из эффективных технологических мероприятий в области повышения надёжности и ресурса гидроцилиндров является упрочнение рабочих поверхностей деталей.

Известно, что титановые сплавы обладают низкими антифрикционными свойствами, что объясняется несколькими причинами: высокой химической активностью титана; тонкой естественной окисной плёнкой, которая при трении в процессе эксплуатации легко разрушается, приводя к схватыванию контактирующих поверхностей; низкой прочностью граничного слоя смазки; низкой теплопроводностью.

По базовой технологии финишными операциями обработки зеркала цилиндров являются доводка и виброгалтовка стальными шариками в среде дисульфида молибдена. Шероховатость поверхности не должна превышать значения $Ra = 0,2$ мкм. Такая обработка не всегда обеспечивает необходимый ресурс фторопластовых уплотнений на штоке.

Использование различных методов нанесения на зеркало цилиндра износостойких покрытий не даёт положительного эффекта. Гальванические и газотермические покрытия не обеспечивают необходимой прочности сцепления с подложкой, а ионно-плазменные покрытия и химико-термическая обработка вследствие высоких температур процессов вызывают коробление цилиндров [1]. Кроме того, согласно техническим требованиям упрочнению подлежит только зеркало цилиндра. Многие технологии нанесения покрытий требуют последующей дополнительной механической обработки для получения необходимых геометрических параметров поверхностного слоя. В ряде случаев используются гидроцилиндры с покрытием химическим никелем. Плохая адгезия таких покрытий к основному материалу приводит к отслоению покрытия в процессе шлифования и при эксплуатации. Кроме того, процесс отделки рабочих поверхностей является нетехнологичным, поскольку включает двойное шлифование (до и после нанесения никеля) и ручную доводку.

Для повышения износостойкости гидроцилиндров предлагается применить электроискровое легирование (ЭИЛ) графитовыми электродами (карбооксидирование) с последующим алмазным выглаживанием полученного покрытия.

Электроискровое легирование

Особенностями условий ЭИЛ, использованных в настоящей работе, является низкая энергия разрядов, воздействующих на поверхность с высокой частотой, что позволяет формировать качественные покрытия толщиной в несколько микрометров с обеспечением низкой шероховатости.

Состав и свойства получаемых покрытий зависят от материала легирующего электрода, технологических параметров, взаимодействия с внешней средой.

ЭИЛ представляет собой сложный процесс плавления и испарения материалов подложки и легирующего электрода, их перемешивания и осаждения на упрочняемую поверхность. Вследствие скоротечности процессов и быстрой кристаллизации сплава формируется сложная закалённая из жидкого состояния структура с высокой прочностью сцепления с подложкой.

При организации процесса ЭИЛ учитываются металлургические аспекты формирования сплава материалов подложки и легирующего электрода, синтез упрочняющих фаз (керамик, интерметаллидных соединений и др.), динамика кристаллизации, состав межэлектродной среды, протекание плазмохимических реакций.

Для обеспечения требуемых функциональных свойств покрытий при легировании используют различные материалы легирующих электродов:

- твёрдосплавные материалы на основе карбидных групп: вольфрамовой, титано-вольфрамовой, титано-тантало-вольфрамовой (ВКЗ, ВК6-М, ВК20, Т15К6, Т30К4, ТТ20К9, ТТ10К8Б и др.);

- керметы и их составляющие. Композициями металлов и сплавов с одной или несколькими керамическими фазами являются структуры типа TiN-Ti, WC-Co, TiB₂-Ti, TiC-Ni, Al₂O₃-Ni и др. В керметы могут входить добавки веществ и металлов, обеспечивающие стабилизацию электроискрового процесса, оказывающие флюсующее воздействие;

- различные металлы и сплавы на их основе;

- графит, кремний, германий и другие полупроводниковые материалы.

Твёрдость и износостойкость легированного слоя зависит от содержания в нём упрочняющих фаз, в частности, карбидных и нитридных. Отсюда эффективность легирования материалами, содержащими углерод, и материалами, которые являются карбидо- или нитридообразующими. Наиболее широко используется ЭИЛ твёрдыми сплавами (ВК6-М, Т15К6) и металлокерамиками (TiC, WC, TiB).

Применение разнообразных материалов электродов, протекание процессов формирования упрочнённого слоя при высоких температурах, скоростях нагрева и охлаждения, создающих условия для синтеза высокопрочных соединений и закалывания, открывают широкие возможности в управлении составом и свойствами упрочняемого слоя.

Одним из существенных факторов, ограничивающих область применения электроискровых процессов, является образование в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, микротрещин и других дефектов. Наиболее эффективным способом борьбы с ними является алмазное выглаживание.

После выглаживания остаточные напряжения в поверхностном слое меняют знак, т.е. появляются напряжения сжатия, причём их уровень практически не зависит от материала легирующего электрода. Выглаживание обработанных ЭИЛ поверхностей значительно снижает величину коэффициента трения. Кроме того, снижается изнашивающая способность, уменьшается длительность приработки и величина износа приработке благодаря уменьшению шероховатости и сглаживанию острых выступов на поверхности покрытия. Снижение шероховатости поверхности и залечивание микротрещин и других дефектов позволяет повысить усталостную прочность изделий, подвергаемых ЭИЛ.

В работе в качестве материалов легирующих электродов использовались пористый графит, пирографит и углеродное волокно.

Выбор графита в качестве электродного материала обоснован рядом его достоинств:

- при взаимодействии с титаном он образует карбиды, обладающие высокой износостойкостью;

- включения графита повышают антифрикционные свойства, поскольку графит в свободном состоянии является твёрдосмазочным материалом;
- не требуется инертная или восстановительная среда, легирование может происходить на открытом воздухе;
- при легировании графитовыми электродами размеры деталей практически не изменяются, что является важным преимуществом.

Обработка методом ЭИЛ обладает рядом преимуществ по сравнению с другими технологиями. Локальность нанесения покрытия, возможность «сканирующего» перемещения инструмента по обрабатываемой поверхности максимально упрощают подготовительные операции. В результате воздействия электрических разрядов, протекающих между поверхностью и дисковым графитовым электродом, на поверхности образуется слой, представляющий собой перемешанный быстрозакалённый материал, содержащий карбиды и оксиды титана, а также графитовые включения, образующиеся в результате воздействия импульсных электрических разрядов малой энергии на обрабатываемую поверхность [2; 3]. Процесс ЭИЛ титановых сплавов графитовым электродом будем называть карбооксидированием.

Карбооксидирование выполнялось на установке ELFA731 с числовым программным управлением по программе, обеспечивающей равномерное упрочнение зеркала цилиндра.

Для эффективного осуществления необходима соответствующая организация процесса: выбор материала графитового электрода, периодическое повторение электрических разрядов и поддержание условий, обеспечивающих их протекание, относительное перемещение электрода и упрочняемого изделия. Формирование слоя происходит в условиях высокоскоростного плавления и охлаждения, деформирования его термическими напряжениями и газодинамическими давлениями от электрического разряда. В результате образуется мелкодисперсная структура сложного состава толщиной (3...10 мкм) с высокими твёрдостью и антифрикционными свойствами в широком диапазоне режимов и условий обработки. Во время карбооксидирования происходит упрочнение и насыщение поверхности титановых сплавов элементами из окружающей среды, а также легирование углеродом.

Экспериментальной отработкой процесса карбооксидирования удалось получить качественные и сплошные покрытия с низкой шероховатостью, устранить такие дефекты как прижоги, бугры, царапины электродом легируемой поверхности. Установлено, что карбооксидирование, выполненное на мягких режимах, короткими импульсами малой энергии обеспечивает получение равномерных и сплошных покрытий [4]. При длительных импульсах процесс идёт более интенсивно с формированием более грубой поверхности, что в итоге может приводить к образованию трещин термического характера, высокой шероховатости, высоким растягивающим остаточным напряжениям и формированию гетерогенной структуры поверхности.

Карбооксидирование графитовыми электродами на режимах обработки со сравнительно высокой энергией формировало структуру слоя с пористым строением. При малых энергиях импульсов формируется мелкодисперсное сплошное покрытие даже на поверхностях со сравнительно высокой исходной шероховатостью.

Конструктивной особенностью обрабатываемой геометрии зеркала (рис. 1) являлись перепускные отверстия для рабочего тела гидроцилиндров. Преимущество технологии ЭИЛ – сканирование инструментом обрабатываемой поверхности (I) – позволило сформировать покрытие по контуру препятствия (II) без необходимости усложнения управляющей программы или создания сложной оснастки (для экранирования внутренних поверхностей отверстия) (рис. 1, в).

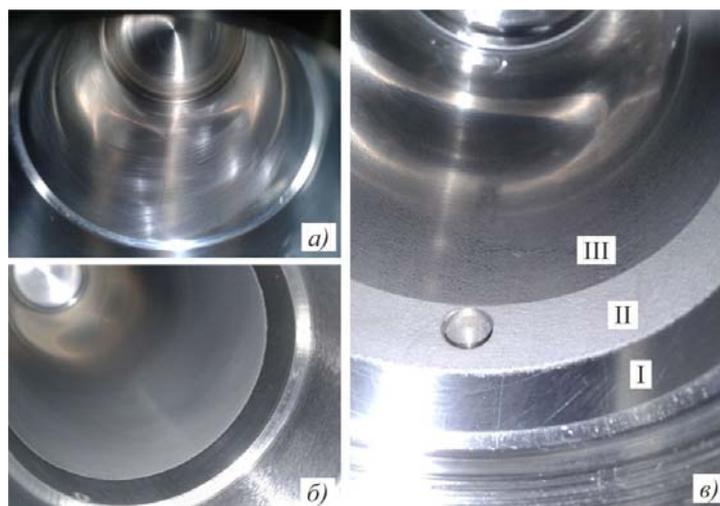


Рис. 1. Поверхность цилиндра:
а – исходная; б - после карбооксидирования; в - исходная поверхность (I)
после карбооксидирования (II) и алмазного выглаживания (III)

Упрочнённую поверхность представляют в виде различных зон, в которых материал непосредственно или косвенно подвергся воздействию импульсных разрядов. В большинстве случаев последовательность образования зон, их количество, структура и свойства зависят от рассмотренных выше условий обработки. Как правило, чёткой разницы между зонами не наблюдается, в большинстве случаев они перекрывают друг друга.

Первая зона характеризуется непосредственно осаждённым в паровой и жидкой фазах материалом электрода, расплавленным и перемешанным с материалом подложки. Оплавленный слой может содержать отдельные элементы внешней среды, диффундирующие в материал и приводящие к образованию новых структур и химических соединений.

Вторая зона представляет собой так называемый «белый слой» – материал, подвергшийся при высоких скоростях нагреву из жидкой фазы и последующей кристаллизации и, как следствие, деформированию под воздействием термических напряжений. Белый слой резко отличается по виду от остальной части поверхностного слоя, однако после термообработки резкая граница между ним и остальной частью поверхностного слоя исчезает, образуется переходная зона. В белом слое легко образуются сплавы компонентов обоих электродов, а также карбиды, окислы и другие элементы внешней среды. На толщину белого слоя влияет длительность и энергия импульса процесса обработки. Белый слой обладает высокой твёрдостью, износостойкостью, высокой химической стойкостью.

Третья зона термического влияния обусловлена формированием соответствующих фазовых и структурных составляющих при нагреве и охлаждении приповерхностных объёмов материала.

Четвёртая зона пластической деформации подвергается воздействию волны напряжений от термодинамического и газодинамического воздействия, от электростатических и электромагнитных сил, а также структурных изменений и других факторов. Под их воздействием происходит пластическая деформация материала, выходящая за пределы зоны термического влияния. Зона пластической деформации характеризуется измельчением зёрен, образованием больших дислокаций, а также изменением параметров решётки [5].

Пятая зона представляет собой не подвергшийся воздействию материал подложки.

Структуру и фазовый состав получаемых карбоксидных покрытий исследовали на характер образующихся в них соединений. Образцы легировались по режимам, представленным в табл. 1.

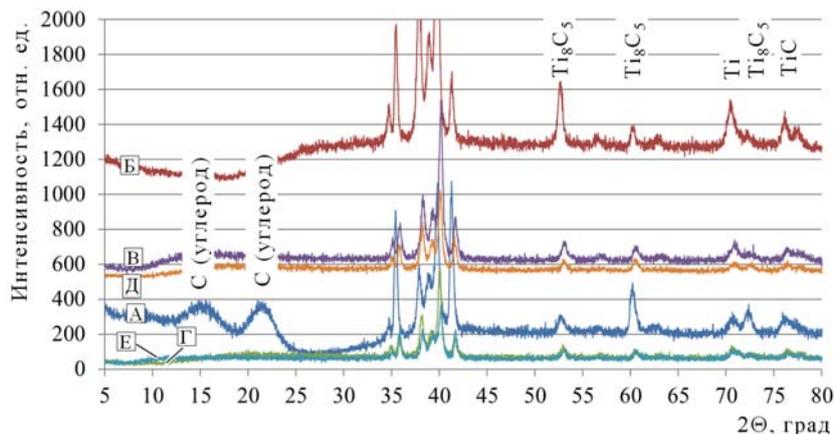
Таблица 1. Режимы карбоксидирования

Образец	А	Б	В	Г	Д	Е
Ток короткого замыкания I_k , А	11,2	11,2	6,4	6,4	8,0	8,0
Скважность q	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Длительность импульса t_u , мкс	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0	5,0
Скорость движения электрода по детали $V_э$, мм/мин	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Скорость вращения электрода относительно детали	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	800,0
Время легирования единицы поверхности t_e , мин/мм ²	0,078	0,039	0,078	0,039	0,039	0,039

Применялся порошковый рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Advance. Дифрактометр позволяет установить зависимость интенсивности излучения рентгеновских лучей, рассеянных покрытиями и плёнками, суспензиями, порошкообразными образцами, стёклами, произвольно ориентированными кристаллами и монокристаллами и т.д., от угла дифракции в диапазонах температур от -180 до $+1600^\circ\text{C}$. На дифрактометре можно проводить как количественный, так и качественный рентгеноструктурные анализы. При проведении качественного анализа применяются специализированные базы данных порошковых рентгенограмм PDF органических и неорганических соединений. Для проведения количественного рентгеноструктурного анализа могут применяться программные комплексы FULLPROF, TOPAS с применением метода Ритвельда для уточнения структуры.

Рентгенограммы покрытий представлены на рис. 2, 3.

В исследуемых покрытиях обнаруживаются: структура упорядоченной фазы Ti_8C_5 , принадлежащей к тригональной симметрии (пр.гр. $R\bar{3}m$); TiC , а также структура $\text{Ti}_6\text{C}_{3,75}$ (рис. 2, 3).

Рис. 2. Рентгенограмма углеродосодержащих покрытий в диапазоне угла сканирования от 5 до 80°

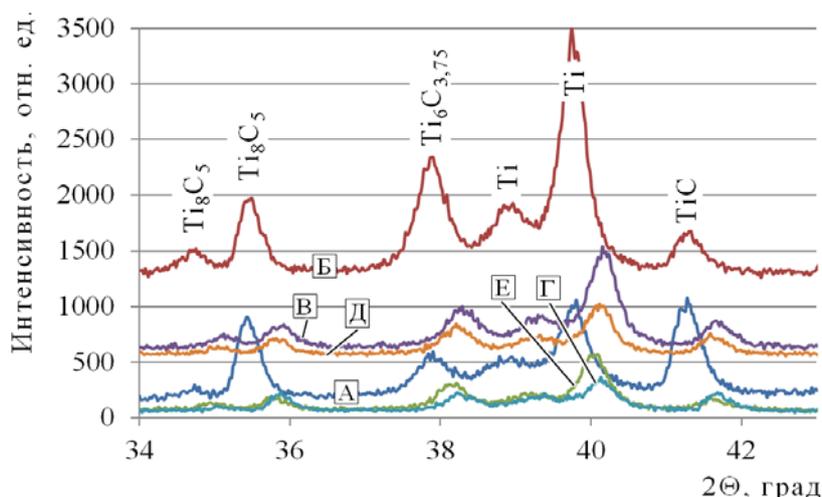


Рис. 3. Рентгенограмма углеродосодержащих покрытий в диапазоне угла сканирования от 34 до 45°

При проведении исследований были установлены следующие режимы дифрактометра: рабочий режим – 40 кВ, 40 мА, Си излучение, никелевый фильтр. Диапазон измерений угла сканирования от 5 до 80°. Шаг по углу сканирования составлял 0,01°. Качественный фазовый анализ образцов проведён с использованием базы данных рентгенографических порошковых стандартов JCPDS ICDD PDF-2.

На микроскоп-спектрометре Renishaw U 1000 были получены спектры комбинационного рассеяния света в интервале 4000–50 см⁻¹ с исследуемых покрытий (рис. 4). Микроскоп оборудован монохроматором SPEX. В качестве возбуждающего источника света использовали аргоновый лазер с длиной волны 514,5 нм.

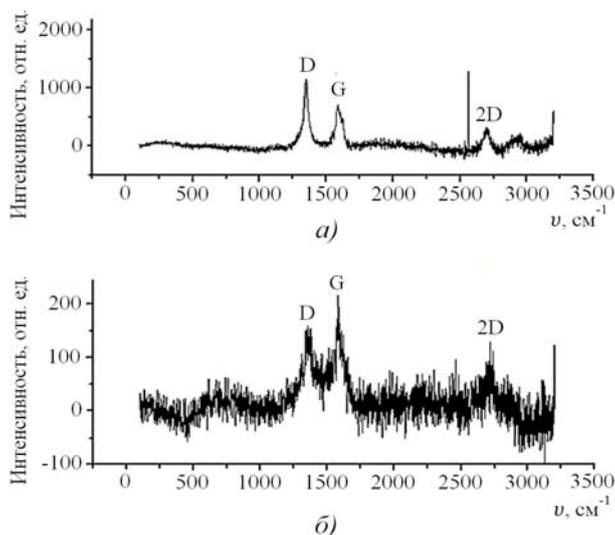


Рис. 4. Спектры частот ν комбинационного рассеяния углеродосодержащих покрытий:

$$a - I_D/I_G = 1,57 ; \quad б - I_D/I_G = 0,71 ; \quad G, 2D, D - \text{спектральные линии}$$

В исследуемых покрытиях локально обнаружены участки с высокой степенью кластеризации графитовых слоёв: D – спектральная линия sp^3 углерод (рис. 4, *a*), а также G – спектральная линия sp^2 углерод (рис. 4, *б*). В покрытиях обнаружено разрушение связей атомов углерода, присоединение атомов водорода и кислорода к атомам углерода, имеющих свободные валентности (отношение интенсивностей $I_D/I_G = 1,57$).

Очевидно, формирование такого состава связано с особенностями протекания процессов электроразрядного воздействия и переноса материала электрода на титановую подложку. Благодаря интенсивным процессам диспергирования и сублимации анода – графита, уже в начале процесса ЭИЛ на катоде, в зоне воздействия разрядов, появляется слой мелкодисперсного графита, который при дальнейшей обработке покрывает всю легируемую поверхность. Последующие разряды протекают в этом слое и через него, который, возможно, и защищает титан от интенсивного окисления. Кроме того, наличие большой концентрации углерода в зоне появления жидкой фазы титана обеспечивает, в первую очередь, синтез TiC (хотя у титана более высокое сродство к кислороду) и диффузию углерода в титановую подложку.

Алмазное выглаживание

Выглаживание выполнялось на токарном станке с использованием специально спроектированного устройства [6], обеспечивающего требуемую силу выглаживания даже при наличии больших биений при вращении заготовки. Было установлено, что выглаживание наконечником с радиусом рабочей части 2 мм позволяет снизить шероховатость поверхности с $Ra = 0,32 \dots 0,63$ мкм до $Ra = 0,1-0,25$ мкм.

Результаты исследований выглаживания на шероховатость поверхности приведены в табл. 2.

Таблица 2. Шероховатость поверхности после выглаживания

Режим карбооксидирования *	Шероховатость поверхности после карбооксидирования, Ra, мкм	Шероховатость поверхности после выглаживания, Ra, мкм
$I_k = 1,2$ А	0,26	0,16
$I_k = 2,6$ А	0,31	0,20
$I_k = 6,2$ А	0,43	0,20
$I_k = 12$ А	0,51	0,23
$I_k = 16$ А	0,62	0,23

* $t_u = 20$ мкс

Заключение

Разработанная технология не потребовала внесения изменений в действующий техпроцесс производства детали, заменены только финишные операции. Предложенные технологические решения обеспечили технические требования по точности и микрогеометрии рабочей поверхности. Испытания, выполненные на технологическом изделии, показали, что износ зеркала за время наработки минимален и его величина на порядок ниже, чем у цилиндров, обработанных по базовой технологии.

Таким образом, карбооксидирование позволяет на порядок повысить ресурс узла без внесения каких-либо конструктивных изменений в геометрию детали. Последующее выглаживание окончательно формирует рабочую поверхность гидроцилиндра с требуемыми качественными характеристиками и микрогеометрией.

Библиографический список

1. Бойцов А.Г., Ковалев А.П., Новиков А.С., Пайкин А.Г., Хворостухин Л.А. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей: уч. пособие. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2007. 584 с.
2. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А., Хворостухин Л.А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М.: Машиностроение, 1991. 144 с.
3. Грачев М.В., Денисов Л.В., Бойцов А.Г. Фазовый и элементный состав поверхностного слоя после электроискрового легирования // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 47-49.
4. Силуянова М.В., Курицына В.В., Бойцов А.Г. Модели и методы технологического аудита наукоёмких производств. М.: Изд-во МАИ, 2017. 160 с.
5. Сильченко О.Б., Силуянова М.В., Низовцев В.Е., Климов Д.А., Корнилов А.А. О перспективах применения наноструктурных гетерофазных полифункциональных композиционных материалов в авиадвигателестроении // Вопросы материаловедения. 2018. № 1(93). С. 50-57. DOI: 10.22349/1994-6716-2018-93-1-50-57.
6. Дмитриев Л.М., Новиков С.В., Силуянова М.В. Концепция оптимизации уязвимости производственно-технологического потенциала российского авиационно-промышленного предприятия от поставочных неблагоприятствований // Авиационная промышленность. 2018. № 1. С. 58-62.

ASSURING PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GAS-TURBINE ENGINE PARTS AND ASSEMBLIES USING ELECTROSPARK DOPING

© 2018

L. V. Denisov Senior Lecturer, Department of Technology of Production and Maintenance of Aircraft Engines; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; gx700fl@mail.ru

A. G. Boytsov Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Technology of Production and Maintenance of Aircraft Engines; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; agboytsov@mail.ru

M. V. Siluyanov Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Technology of Production and Maintenance of Aircraft Engines; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; dc2mati@yandex.ru

The article describes surface hardening of aircraft engine titanium-alloy hydraulic cylinder face using the method of electro-spark doping by low-energy discharges. Graphite electrodes were used to provide functional behavior of the cylinder surface layer. The carbon oxide layer formed has a highly dispersed structure of a complex composition (with particles of titanium carbide, titanium oxide, graphite), 3-10 micron thick, characterized by high hardness and sliding properties. Graphite electrode alloying practically does not change the part dimensions. Subsequent diamond burnishing of the hardened surfaces decreases the value of the friction coefficient and surface roughness. Healing of defects and micro-cracks improves the fatigue resistance of the part. The developed technology makes it possible to assure the characteristics required of hydraulic cylinder work surfaces and increase their life.

Carbooxidation; electro-spark doping; diamond burnishing; hardening; titanium alloys; hydraulic cylinder.

Citation: Denisov L.V., Boytsov A.G., Siluyanov M.V. Assuring performance characteristics of gas-turbine engine parts and assemblies using electrospark doping. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 2. P. 58-67. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-58-67

References

1. Boytsov A.G., Kovalev A.P., Novikov A.S., Paykin A.G., Khvorostukhin L.A. *Protsessy mekhanicheskoy i fiziko-khimicheskoy obrabotki v proizvodstve aviatsionnykh dvigateley: uch. posobiye* [Processes of machining and physicochemical treatment in aircraft engine production]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2007. 584 p.
2. Boytsov A.G., Mashkov V.N., Smolentsev V.A., Khvorostukhin L.A. *Uprochneniye poverkhnostey detaley kombinirovannymi sposobami* [Hardening of part surfaces with the use of combined methods]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1991. 144 p.
3. Grachev M.V., Denisov L.V., Boytsov A.G. Phase composition and element concentration in surface layer after ESD. *Trudy GOSNITI*. 2010. V. 106. P. 47-49. (In Russ.)
4. Siluyanova M.V., Kuritsyna V.V., Boytsov A.G. *Modeli i metody tekhnologicheskogo audita naukoymkikh proizvodstv* [Models and methods of process audit in high-tech industries]. Moscow: MAI Publ., 2017. 160 p.
5. Silchenko O.B., Siluyanova M.V., Nizovtsev V.E., Klimov D.A., Kornilov A.A. On the prospects of application of nanostructured heterophase polyfunctional composite materials in engine building industry. *Voprosy materialovedeniya*. 2018. No. 1(93). P. 50-57. DOI: 10.22349/1994-6716-2018-93-1-50-57 (In Russ.)
6. Dmitriev L.M., Novikov S.V., Siluyanova M.V. A concept for optimizing vulnerability of production and technological potential of a Russian aircraft industry enterprise against supply adversities. *Aviation Industry*. 2018. No. 1. P. 58-62. (In Russ.)