

УДК 629.7.017.1:621.452.3.023:621.7/9

**К.А. ДАНЬКО, И.В. ЗОРИК**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

*В статье проведен анализ состояния проблемы повышения жизненного цикла деталей авиационных двигателей технологическими методами. Среди рассмотренных – методы поверхностно-пластического деформирования, термическая обработка, диффузионное насыщение, обработка в магнитном поле, электрофизическая обработка, отделочно-упрочняющая обработка и нанесение функциональных покрытий. Тщательное рассмотрение вышеперечисленных методов, позволило выделить высокоскоростное газопламенное напыление покрытий как метод, обладающий широкими технологическими возможностями и экономической эффективностью.*

**Ключевые слова:** ремонтпригодность, дорнование, чеканка, закалка, отпуск, цементация, азотирование, полирование, напыление, высокоскоростное газопламенное напыление.

### **Введение**

Тенденции развития авиационной техники и сложившиеся на сегодняшний день рыночные отношения между отечественными предприятиями авиационной отрасли и зарубежными партнерами выносят на передний план вопросы повышения ресурса силовых установок летательных аппаратов, ремонтпригодности их деталей и узлов, снижения уровня шума, сокращения количества вредных выбросов в атмосферу и экономии топлива.

С каждым годом география использования отечественных авиационных двигателей расширяется. На сегодняшний день, двигатели, выпускаемые лидером производства авиационных двигателей (АД) в СНГ – ОАО «Мотор Сич», эксплуатируются в России (Д-436 для Ан-148 и др.), Индии (АИ-20Д-5М для многоцелевых самолетов Ан-32), Китае (АИ-222-25F для китайских учебно-тренировочных самолетов L-15), Иране (ТВЗ-117ВМА-СБМ1 для самолета Iran-140), Ливии (Д-36 для самолетов Ан-74), Южной Кореи (ТВЗ-117 ВМА, АИ-9 для вертолета Ка-32), Алжире (АИ-222-25 для самолетов Як-130) и многих других странах. Специфика эксплуатации нашей техники в условиях, не характерных для климатических и географических условий Украины, заключается в наличии следующих факторов: повышенная влажность при высоких температурах, характерные для тропического климата; высокая разреженность воздуха в высокогорных регионах; значительная запыленность воздуха, при эксплуатации в условиях отсутствия взлетно-посадочной полосы с твердым покрытием; засоренность

воздуха песком, характерная для работы в условиях пустыни и т.д.

Ежегодные убытки авиационной отрасли по причине преждевременного выхода из строя отдельных деталей и узлов АД составляют миллионы гривен, а расход дорогостоящих материалов на изготовление запасных частей узлов и агрегатов АД часто соизмерим с уровнем его расхода при производстве новых изделий. Выходом из сложившейся ситуации служит широкое использование различных методов модификации и упрочнения поверхностных слоев деталей с целью увеличения их жизненного цикла.

Решению данного вопроса посвящено много работ [1 – 11], но, не смотря на это, он не теряет своей актуальности. На сегодняшний день наиболее распространенными в авиадвигателестроении способами увеличения ресурса деталей являются следующие: поверхностно-пластическое деформирование (ППД), термическая обработка (ТО), диффузионное насыщение, нанесение функциональных покрытий, обработка в магнитном поле, электрофизическая обработка, отделочно-упрочняющая обработка.

На рис. 1 представлена классификация методов упрочнения металлических деталей АД, составленная на базе существующих классификаций [1, 9].

**Целью данной статьи** является анализ существующих на сегодняшний день технологических методов увеличения ресурса деталей АД и выявление наиболее эффективных с точки зрения экономических показателей, технологических возможностей и эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей АД.



Рис. 1. Методы упрочнения металла

### Технологические методы повышения жизненного цикла деталей АД

Одним из методов, широко применяемых с целью повышения усталостной прочности, контактной выносливости и износостойкости, достижения более низких значений шероховатости поверхностей деталей АД является метод поверхностно-пластического деформирования. Благодаря уменьшению высоты микронеровностей, сглаживанию их формы и уп-

рочнению поверхностного слоя, детали, обработанные этим методом, имеют значительно более высокую несущую способность, по сравнению с деталями, не подвергнутыми ППД.

Наиболее распространенные способы упрочнения пластическим деформированием поверхностей деталей АД показаны в табл. 1.

Все применяемые методы ППД, в зависимости от механики процесса, разделяют на две основные группы [1, 11]:

Таблица 1

Способы упрочнения пластическим деформированием поверхностей деталей АД

№ п/п	Название метода	Тип обрабатываемой поверхности					
		Наружные цилиндрические	Отверстия	Торцы и кромки отверстий	Плоские поверхности	Фасонные поверхности	
1.	Обкатывание роликами/шариками	"+"	"_"	"+"	"+"	"+"	
2.	Алмазное выглаживание	"+"	"+"	"+"	"+"	"+"	
3.	Дорнование	"_"	"+"	"_"	"_"	"_"	
4.	Раскатывание	• центробежная обработка отверстий шариками • ротационное раскатывание роликами	"_"	"+"	"_"	"_"	"_"
5.	Прессовая чеканка	"_"	"+"	"_"	"_"	"_"	
6.	Дробеструйная обработка	• пневмодробеструйная	"+"	"+"	"+"	"+"	
		• гидродробеструйная	"_"	"_"	"_"	"_"	
7.	Виброобработка	• ультразвуковое упрочнение	"_"	"_"	"_"	"_"	
		• виброабразивное полирование	"_"	"_"	"_"	"_"	
		• виброгалтовка	"_"	"_"	"_"	"_"	
		• вибрационное упрочнение	"_"	"_"	"_"	"_"	
8.	Центробежная динамическая ППО	• обработка шариками	"_"	"_"	"_"	"_"	
		• обработка щетками	"_"	"_"	"_"	"_"	
		• обработка пружинным инструментом	"_"	"_"	"_"	"_"	
9.	Чеканка	"_"	"_"	"_"	"_"	"_"	
10.	Обработка дробью устройствами хаотического типа	"_"	"_"	"_"	"_"	"_"	
11.	Пневмоимпульсная обработка	"_"	"_"	"_"	"_"	"_"	
12.	Обработка взрывом	"_"	"_"	"_"	"_"	"_"	

"+" – метод применяется для данного типа поверхности; "-" – метод не применяется для данного типа поверхности.

1) статические (сила прижима обрабатываемых элементов к обрабатываемой поверхности имеет постоянное значение, а обрабатывающие элементы во время обработки находятся в постоянном контакте с обрабатываемой поверхностью);

2) динамические (силы прижима периодически изменяются во время обработки, а элементы, выполняющие поверхностную пластическую обработку, находятся или не находятся в постоянном контакте с обрабатываемой поверхностью и периодически воздействуют на нее с большой частотой).

Учитывая особенности обработки наружных цилиндрических поверхностей, отверстий в деталях АД, торцов и кромок отверстий, плоских и фасон-

ных поверхностей каждая из этих групп рассматривается отдельно.

Как метод упрочнения, ППД имеет много преимуществ. К числу основных можно отнести уменьшение шероховатости, возможность получения заданных параметров величины и глубины упрочнения поверхностного слоя, возможность регулирования параметров микрорельефа обрабатываемых поверхностей (например с целью лучшего удержания смазки, меньшего износа, коррозии и схватывания). Недостатками данного метода являются невозможность восстановления изношенных поверхностей деталей, низкая производительность и быстрый износ оборудования для ППД (рабочие

части песко-, дробеструйных аппаратов, ролики, алмазные наконечники) [12–25].

Термическая обработка (ТО) металлических деталей АД чаще всего представляет собой комплекс операций, в результате которых получают заданные свойства детали. В зависимости от назначения термообработки, различают следующие основные ее виды:

- отжиг (снятие остаточных напряжений, выравнивание химической неоднородности);
- нормализация (исправление структуры перегрева стали, снятие внутренних напряжений, разрушение карбидной сетки);
- закалка (придание стали наибольшей твердости);
- отпуск (уменьшение или полное снятие остаточных напряжений, увеличение пластичности стали);
- улучшение (закалка плюс высокий отпуск);
- патентирование (получение высоких механических свойств перед волочением);
- старение (повышение твердости и прочности, снижение вязкости);
- криогенная обработка (закалка и обработка холодом от температуры закалки или от нормальной температуры, термоциклирование) [26–31].

Термообработка металлических деталей АД, как метод увеличения их ресурса и прочности, обладает следующими преимуществами: высокая степень проработки и налаженность технологического процесса ТО; возможность получения заданных свойств детали путем изменений в ее кристаллической решетке (не нужны дополнительные дорогостоящие материалы); высокая прогнозируемость результатов. К недостаткам упрочнения металлов методом ТО относятся: высокая вероятность деформации детали; окисление и обезуглероживание поверхностного слоя детали; необходимость в высококвалифицированных рабочих (требуется строгое соблюдение технологического процесса ТО); сложное, громоздкое и энергоемкое оборудование (мощность электропечей сопротивления непрерывного действия от 135 кВт (СТО-5.60.5/3Б1) до 588 кВт (70КБ-1564) и выше, конвейерных электропечей – от 54,4 кВт (СКЗ – 4.20.1/7Б2) до 317 кВт (СКЗ – 8.60.2,5/10М1)); низкая производительность и невозможность восстанавливать изношенные детали; данный метод не является универсальным (не все металлы поддаются термообработке) [30].

Диффузионное насыщение является распространенным методом упрочнения деталей АД и представляет собой процесс, при котором под действием определенных температур и активных сред (газовых, твердых или жидких) происходят изменения химического состава, структуры и свойств поверхности изделий.

В авиадвигателестроении применяют следующие виды диффузионного насыщения:

- цементация (повышение твердости, теплоустойчивости, износостойкости и усталостной прочности стальных деталей при условии их последующей закалки);

- азотирование (получение высокой поверхностной твердости и износостойкости, сжимающих остаточных напряжений на поверхности);

- нитроцементация, цианирование (повышение твердости поверхности, сопротивления износу и задиру, хорошая прирабатываемость);

- борирование (повышение износостойкости и красностойкости стальных деталей);

- хромирование (повышение жаро- и износостойкости, коррозионной и кавитационной стойкости);

- алитирование (повышение окалиностойкости, сопротивляемости коррозии).

Также находят применение ванидирование, ниобирование, сульфидирование и комбинации вышеупомянутых методов: боросульфидирование, борохромирование, боромеднение, бороалитирование, бороцирконирование, хромотитанирование, хромосилицирование, хромоалитирование, карбованадийтитанирование, циркотитанирование, циркосилицирование, сульфоцианирование, титаноалитирование и др. [9, 26, 31]

Основными преимуществами методов диффузионного насыщения являются возможность получения заданных параметров поверхностного слоя деталей АД, изменяющихся по глубине (высокая твердость поверхности и вязкая сердцевина); возможность применения простых углеродистых сталей для изготовления деталей, обладающих высокой жаростойкостью (после операции алитирования, хромирования или силицирования). К недостаткам метода относится экологическая небезопасность и большая продолжительность процесса (особенно при диффузии металлов).

Суть метода упрочнения металлических деталей АД обработкой в магнитном поле состоит в изменении энергетического запаса поверхностного слоя детали (электроферромагнитная обработка, обработка в импульсном магнитном поле). Воздействием магнитного поля на закаленные детали АД достигают дополнительного образования мартенсита, что ведет к увеличению их твердости. Кроме того, проф. В.Д. Евдокимовым и доц. Л.В. Кошарской разработана методика упрочнения сталей с применением магнитного поля и высокоскоростного трения, позволяющая повысить износостойкость в 1,5 раза [9, 32].

Обработка металлических деталей АД в магнитном поле позволяет повысить их эксплуатационные свойства и ресурс за счет внутренних резервов материала детали. Это и является отличительной чертой и достоинством данного метода. Основным его недостатком – ограниченные технологические возможности.

Электрофизическая обработка деталей АД с целью их упрочнения включает в себя следующие методы:

- электроэрозионная обработка: электроискровая обработка, электроимпульсная обработка;
- ультразвуковая обработка (повышаются показатели механических свойств обрабатываемых деталей при их закалке, снижаются остаточные напряжения при отпуске, повышается твердость (при воздействии мощных УЗ колебаний)) [9, 34].

Достоинства метода – простота реализации и высокие эксплуатационные показатели поверхности обработанной детали, недостатки – низкая производительность и высокая энергоемкость процесса.

Среди методов отделочно-упрочняющей обработки деталей АД, увеличивающих их ресурс, можно выделить следующие:

- магнитно-абразивное полирование (МАП) (повышение микротвердости поверхности образцов по сравнению со шлифованными, упрочнение за счет тонкой структуры, удаление дефектного слоя, изменение направления микронеровностей и, как результат, повышение износостойкости и эксплуатационных характеристик поверхностного слоя). Применяется для обработки титановых сплавов (BT5) [1];

- полирование сизалевыми кругами с жидкими абразивными пастами (отсутствие термопластических деформаций, уменьшение рассеяния параметров шероховатости по сравнению с ручным полированием, отсутствие внедренных в поверхностный слой абразивных зерен, наведение сжимающих остаточных напряжений, увеличение сопротивления усталости и предела выносливости). Используется для обработки дисков компрессора ГТД (сплав BT9) [1];

- турбоабразивная обработка (ТАО) (отсутствие механических и тепловых деформаций, формирование остаточных напряжений сжатия, и как следствие, повышение предела выносливости и циклической долговечности). Разработаны технологии обработки лопаток ГТД, зубчатых колес, дисков компрессоров и турбин (BT8, BT3-1, ЭИ698-ВД), сварных барабанов роторов компрессоров ГТД, валов роторов компрессора высокого давления (КВД) (ЭИ437БУ-ВД, ЭИ698-ВД) и других ответственных деталей из конструкционных и нержавеющей сталей, цветных, титановых и жаропрочных сплавов [1].

В эту группу можно отнести также традиционные шлифование, суперфиниширование и хонингование [9].

Широкое применение отделочно-упрочняющей обработки в авиадвигателестроении объясняется универсальностью инструмента (МАП, ТАО и др.), возможностью повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя титановых сплавов [1], низкотемпературным характером процессов. Но, в то же время, технологические возможности метода ограничены возможностями материала обрабатываемой детали, и, кроме того, высока вероятность шаржирования обрабатываемой поверхности частичками абразива.

Нанесение функциональных покрытий на металлические детали АД как метод повышения их жизненного цикла, содержит в себе множество способов и еще большее количество типов функциональных покрытий. В связи с широким диапазоном условий работы деталей АД, находят применение не только металлические функциональные покрытия (рис. 2), а еще и лакокрасочные покрытия, твердые антифрикционные и эмалевые пленки [1, 9, 10, 35, 36].

Из вышеперечисленных, наибольший интерес представляют металлические покрытия. Необходимое качество металлических покрытий на детали АД обеспечивают методы газотермического напыления со сверхзвуковой скоростью истечения рабочей среды — детонационный, высокоскоростной газопламенный, высокоскоростной электродуговой, высокоскоростной плазменный и импульсно-плазменный.

На сегодняшний день наиболее динамично развивающимся методом нанесения функциональных покрытий является метод высокоскоростного газопламенного напыления. Этот метод включает в себя различные способы, отличающиеся видом приме-



Рис. 2. Классификация процессов нанесения металлических покрытий

няемого топлива (газообразное или жидкое), типом окислителя (кислород или воздух), структурой распыляемого материала (порошок или проволока). С точки зрения обеспечения максимального качества напыленного покрытия и энергетических параметров газовой струи, нагревающей и ускоряющей напыляемый материал, стоит выделить способ высокоскоростного газопламенного напыления порошковых материалов с применением углеводородного газообразного топлива и кислорода, в качестве окислителя. В зарубежных источниках данный способ известен как High velocity oxy-fuel (HVOF).

В горелках, реализующих данный способ, порошок нагревается до температуры, близкой к температуре его плавления или чуть превышающей ее, и, будучи ускоренным сверхзвуковым потоком, формирует на подложке плотное пластинчатое покрытие. Данным способом напыляют износостойкие покрытия, такие как WC-Co, CrC-Ni-Cr, а также покрытия из керамики, металлические покрытия и некоторые оксиды. В среднем, толщина напыляемых покрытий колеблется от 0,05 до 0,5 мм, но возможно напыление и существенно больших толщин [37 – 40].

HVOF-напыление широко применяется для ремонта, защиты от износа и коррозии всех типов (в том числе высокотемпературной) в авиационной отрасли. Оно позволяет получать детали, сочетающие вязкость и пластичность материала подложки с заданными свойствами поверхностного слоя, наиболее подверженного воздействию ударных нагрузок, коррозии, изнашиванию, эрозии и, по сути, объединяют в себе преимущества детонационного и газопламенного напыления, исключая их недостатки [37, 38].

Внедрение метода высокоскоростного газопламенного напыления покрытий позволило решить важные технические задачи восстановления и продления ресурса деталей в авиационной отрасли (лопатки газовых турбин, тормозные колодки, валы, посадочные места под подшипники, уплотнения статора), на предприятиях металлургической промышленности (валки прокатных станов, кристаллизаторы, фильеры), в области энергетики (детали роторов и уплотнение статоров гидро-, паровых и газовых турбин), а также в автомобилестроении, полиграфии, целлюлозно-бумажной и химической промышленности и др.

Широкое распространение данный метод получил благодаря своим уникальным возможностям и преимуществам перед существующими:

– высокая адгезионная прочность (60-80 МПа) [39];

– низкая пористость (< 2 %) [40];

– возможность напыления покрытий из материалов, для которых температура перехода в пластическое состояние ниже температуры сгорания углеводородных топлив в кислороде (~3300 К) [41];

– по сравнению со звуковыми методами – хорошая адгезионная и когезионная прочность, низкая пористость, поры не связаны между собой, низкое содержание оксидов при напылении металлических покрытий, низкие потери легирующих элементов напыляемого материала и, как следствие, предсказуемый химический состав покрытия, мелкодисперсная, гомогенная микроструктура покрытия, низкие остаточные напряжения, высокая микротвердость, незначительное тепловое воздействие на подложку, возможность получения большой толщины покрытий, гладкая поверхность покрытий [10, 42];

– возможность использования различных видов топлива: жидких (керосин, этиловый спирт) и газообразных (ацетилен, пропан, бутан, метан, МАФ-газ) позволяет подобрать оптимальные параметры процесса, обеспечивающие высокое качество покрытия с минимальным воздействием на окружающую среду [43];

– с точки зрения условий формирования покрытий и производительности напыления, непрерывный метод HVOF лучше импульсного детонационного;

– современный уровень теоретических знаний в области аэродинамики сопла (в том числе и двухфазных течений) позволяет без каких-либо затруднений проектировать оборудование для высокоскоростного газопламенного напыления покрытий, и с высокой степенью точности моделировать поведение частиц напыляемого порошка металла [44 – 50].

## Заключение

Таким образом, метод высокоскоростного газопламенного напыления покрытий является уникальным, с точки зрения технологических возможностей и качества обработанной поверхности и заслуживает повсеместного внедрения в технологические процессы изготовления и ремонта деталей АД. Кроме того, необходимо укрепление научной базы процесса с целью совершенствования оборудования и достижения лучших эксплуатационных показателей покрытий.

## Литература

1. *Технология производства авиационных двигателей ч. 3. Методы обработки деталей авиационных двигателей / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.К. Яценко, А.И. Долматов, А.В. Богуслаев и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2008. – 638 с.*
2. *Багмет М.Н. Разработка комплексных технологий, повышающих жизненный цикл деталей и узлов авиационных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / М.Н. Багмет. – Х., 2003. – 265 с.*
3. *Яцерицын П.И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / П.И. Яцерицын, Ю.В. Скорьнин. – Минск: Наука и техника, 1978. – 120 с.*

4. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко. – К.: Манускрипт, 1993. – 322 с.
5. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессоров и вентиляторов. Ч. 1.: моногр. / В.А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 396 с.
6. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Ч. 2.: моногр. / В.А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 420 с.
7. Кудрявцев И.В. Повышение несущей способности крупных стальных валов / И.В. Кудрявцев, М.Я. Белкин // ЦНИИТМАШ, 1962. – №4. – С. 113-132.
8. Хасуй А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моригаки.: пер. с яп. / В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
9. Евдокимов В.Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов: учеб. пособие-справ. / В.Д. Евдокимов, Л.П. Клименко, А.Н. Евдокимова. – К.: Профессионал, 2006. – 352 с.
10. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор) / В.А. Фролов, В.А. Поклад // Технология машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 45-53.
11. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
12. Справочник металлиста в пяти томах. Т. 5.; под ред. канд. техн. наук А.Н. Малова. – М.: Машигиз, 1960. – 1184 с.
13. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В.М. Браславский. – М.: Машиностроение, 1966. – 160 с.
14. Барац А. И. Поверхностное упрочнение деталей машин обкаткой роликами / А.И. Барац. – Х.: ГНТИ, 1959. – 137 с.
15. Папиев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папиев. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.
16. Внутренние напряжения при обкатке роликами / Э.Ф. Финкенштейн, У. Прекель // Черные металлы. – 1984. – № 14. – С. 13-17.
17. Торбило В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 133 с.
18. Хворостухин Л.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалёв, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
19. Отделочно-упрочняющая обработка алмазным выглаживанием / Л.А. Хворостухин, Н.В. Плешивцев, В.Н. Бибаев // Вестник машиностроения. – 1969. – № 8. – С. 48 – 50.
20. Diamond burnishing / Е.Н. Hull // Machinery (N.Y.). – 1962. – Vol. 68. – N 5.
21. Яценко В.К. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.К. Яценко, Г.З. Зайцев, В.Ф. Притченко, Л.И. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
22. Одинцов В.М. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / В.М. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
23. Головань А.Я. Алмазное выглаживание и точение / А.Я. Головань, Э.Г. Грановский, В.Н. Машков. – М.: Машиностроение, 1976. – 290 с.
24. Лукьянец В.А. Физические эффекты в машиностроении: справочник / В.А. Лукьянец [и др.]; под общ. ред. В.А. Лукьянца. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с.
25. Справочник машиностроителя в 3-х томах. Т. 2. Предс. ред. совета – акад. Е.А. Чудаков. Главн. ред. тома Э.А. Сатель. – М.: МАШГИЗ, 1952. – 1080 с.
26. Циммерман Р. Металлургия и материаловедение: справ. изд.: пер. с нем. / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.
27. Каменичный И.С. Краткий справочник технолога-термиста / И.С. Каменичный. – М.: Машигиз, 1963. – 287 с.
28. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
29. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы / М.А. Тылкин. – М.: Металлургия, 1981. – 648 с.
30. Каменичный И.С. Спутник термиста / И.С. Каменичный. – К.: Техніка, 1978. – 230 с.
31. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
32. Калетина Ю.В. Влияние магнитного поля на количество остаточного аустенита в закаленных сталях / Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – №10. – С. 25 – 29.
33. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов: учебник для ПТУ / Е.Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
34. Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник / Д.Я. Попилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
35. Заляева Г.О. Диагностика, ремонт, монтаж, сервисное обслуживание оборудования: учебно-метод. пос. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 106 с.
36. Покрытия и обработка поверхности для защиты от коррозии и износа: сб. статей под ред. К.Н. Страффорда, П.К. Даты, К.Дж. Гуджена. пер. с англ. / под ред. В.В. Кудинова. – М.: Металлургия, 1991. – 243 с.
37. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
38. Михайловский Ю.Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты / Ю.Н. Михайловский. – М.: Металлургия, 1989. – 103 с.
39. Pawlowski Lech, The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: second edition / Lech Pawlowski

lowski. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 626 p.

40. Handbook of deposition technologies for films and coatings. Science, Technology and Applications / edited by Rointan F. Bunshah. – Los Angeles, California, University of California: Noyes Publications, 1994. – 888 p.

41. Высокоскоростное газопламенное напыление двухкамерными горелочными устройствами / Ю.И. Евдокименко, В.М. Кисель, В.Х. Кадыров, А.А. Король, И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк // Порошковая металлургия. – 2003. – №11/12. – С. 45-54.

42. Оборудование для нанесения защитных покрытий газопламенным сверхзвуковым напылением / Ю.С. Коробов // Авиационная промышленность. – 2005. – № 4. – С. 14-17.

43. Voronetski A. Analysis of potential improvements of HVOF based processes / A. Voronetski, V. Belashchenko // Proceedings of the 2006 International Spray Conference, May 15 – 18, 2006, Seattle, Washington, USA

44. Дейч М.Е. Техническая газодинамика / М.Е. Дейч. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.

45. Левинсон Я.И. Аэродинамика больших скоростей / Я.И. Левинсон. – М.: Гособоронгиз, 1950. – 352 с.

46. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели / М.В. Добровольский. – М.: Машиностроение, 1968. – 396 с.

47. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1980. – 533 с.

48. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Я. Крайко, Г.П. Прокопов. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

49. Болгарский А.В. Рабочие процессы в жидкостно-реактивных двигателях / А.В. Болгарский, В.К. Шукин – М.: Гособоронгиз, 1953. – 424 с.

50. Тимошенко В.И. Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов / В.И. Тимошенко. – Днепропетровск: Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2003. – 460 с.

Поступила в редакцию 30.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., директор МИНТ «ХАИ» В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

#### АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

*К.А. Данько, І.В. Зорік*

У статті наведений аналіз стану проблеми підвищення життєвого циклу деталей авіаційних двигунів технологічними методами. Серед розглянутих – методи поверхнево-пластичної деформації, термічна обробка, дифузійне насичення, обробка у магнітному полі, електрофізична обробка, обробно-зміцнюючі методи та нанесення функціональних покриттів. Детальний розгляд вищезгаданих методів дозволив виділити високошвидкісне газополуменеве напилення покриттів як економічно обґрунтований метод, що має широкі технологічні можливості.

**Ключові слова:** ремонтпригодність, дорнування, чеканка, гартування, відпускання, цементация, азотування, полірування, напилення, високошвидкісне газополуменеве напилення.

#### ANALYSIS OF THE PROLONGATION OF LIFE CYCLE PROBLEM FOR THE AERO-ENGINE'S PARTS BY TECHNOLOGICAL METHODS

*K.A. Danko, I.V. Zorik*

In the article the analysis of the prolongation of the life cycle problem for the aero-engine's parts by technological methods is conducted. Among the considered are: surface plastic deformation methods, thermal treatment, diffusion saturation, treatment in a magnetic field, electrophysical machining, finishing and strengthening machining, deposition of functional coatings. Careful consideration of those methods made it possible to pick out high velocity gas-flame spraying method as the one, that is characterized by wide technological facilities and economical efficiency.

**Key words:** maintainability, burnishing, chasing, hardening, abatement, cementation, nitride hardening, polishing, spraying, high velocity gas-flame spraying.

**Данько Константин Анатольевич** – мл. научный сотрудник каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ConstantineDanko@mail.ru.

**Зорик Игорь Владимирович** – ст. преподаватель каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.