

УДК 621.01(06)

**Т. В. Хавлин**<sup>1</sup>, соискатель, **А. Н. Михайлов**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
**Д. А. Михайлов**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ст. преп., **В. А. Михайлов**<sup>2</sup>, аспирант,  
**С. В. Глухов**<sup>1</sup>, старший преподаватель

<sup>1</sup>ГОО ВПО «Донецкая академия внутренних дел МВД ДНР»,

<sup>2</sup>ГОУ ВПО Донецкий национальный технический университет, ДНР,

<sup>3</sup>ГОУВПО «Академия гражданской защиты», ДНР

Тел./факс: +38(071)3122392; E-mail: [strana.sovetov.80@mail.ru](mailto:strana.sovetov.80@mail.ru)

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ И СОСТАВЛЯЮЩИЕ ОБЩЕГО ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*В данной статье выполняется классификация функционально-ориентированных покрытий, которые могут применяться для защиты лопаток турбин газотурбинных двигателей, изучаются возможные способы повышения ресурса лопаток на базе функционально-ориентированного подхода, предлагается вариант общей блок-схемы проведения исследования в данной области.*

**Ключевые слова:** лопатка турбины авиационного двигателя, способы повышения качества, классификация, функционально-ориентированные технологии, защитные покрытия.

**T. V. Khavlin, A. N. Mikhailov, D. A. Mikhailov, V. A. Mikhailov, S.V. Glukhov**

## SEQUENCE AND DETERMINE THE COMPONENTS OF THE OVERALL PROCESS OF DEVELOPING A METHOD OF INCREASING THE LIFE OF TURBINE BLADES OF GAS TURBINE ENGINES

*In this article, the classification of functionally-oriented coatings that can be used to protect turbine blades of gas turbine engines, the possible ways to improve the life of the blades on the basis of a functionally-oriented approach, the variant of the General block diagram of the study in this area.*

**Keywords:** aircraft engine turbine blade, methods of quality improvement, classification, function-oriented technologies, protective coatings.

### 1. Введение

Высокая температура, давление, наличие механических и химических примесей в топливе, сложно структурированные напряжения растяжения, вибрации и изгиба являются факторами, определяющими сложность условий эксплуатации лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей (далее – ЛТ ГТД), а особенности – неоднородности возникающих повреждений. Подвергаясь воздействию различных нагрузок, которые вдобавок непостоянны по продолжительности и неравномерны по мощности воздействия на различные элементы (части, зоны), ЛТ ГТД на своём уровне должны обеспечить стабильность работы турбины, а тем самым и обеспечить надёжность при эксплуатации авиационного двигателя в целом [1].

В связи с этим, в данной статье рассматривается возможность повысить ресурс ЛТ ГТД работающих в агрессивной среде (высокотемпературная коррозия, механическая эрозия, диффузия покрытия и основного металла и т.д.). Для чего планируется создать технологический процесс, универсальность которого базируется на основе синтеза функционально-ориентированных технологий способных обеспечить равно уровневую равно эффективную защиту всех поверхностей ЛТ ГТД [2] различных турбин.

Для осуществления данной задачи выполняется изучение ряда вопросов, например, таких как:

1. Классификация функционально-ориентированных покрытий (далее – ФОП) для придания специальных свойств ЛТ ГТД.

2. Разработка способа повышения ресурса ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированного подхода.

3. Составление общей блок-схемы исследования проводимого с целью повышения ресурса ЛТ ГТД.

Цель данной работы – изучить последовательность и определить составляющие общего процесса разработки метода повышения ресурса ЛТ ГТД.

Для выполнения целевого исследования в данной работе решаются следующие задачи:

1. Выполняется классификация ФОП ЛТ ГТД.

2. Разрабатывается способ повышения качества ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированного подхода.

3. Составляется общая блок-схема исследования проводимого с целью повышения ресурса ЛТ ГТД.

## 2. Основное содержание и результаты работы по выполнению классификации ФОП ЛТ ГТД

Работа по созданию метода повышения ресурса ЛТ ГТД объединяет в себе множество действий, необходимых для применения в синтезе процесса, направленного на

создание условий способных сориентировать технологов в выборе (создании) верной (правильной) технологии способной повысить ресурс изделия. Возможность осуществления качественного синтеза технологий применимых для повышения ресурса ЛТ ГТД во многом определяется наличием разнообразных и разно уровневых составляющих как материальных, так и интеллектуальных, и энергетических. Множество таких составляющих определит ограничения в логике выбора способов и методов при создании технологий.

Таковыми составляющими являются различные теории, наблюдения, исследования, мнения, выводы, факты, факторы,

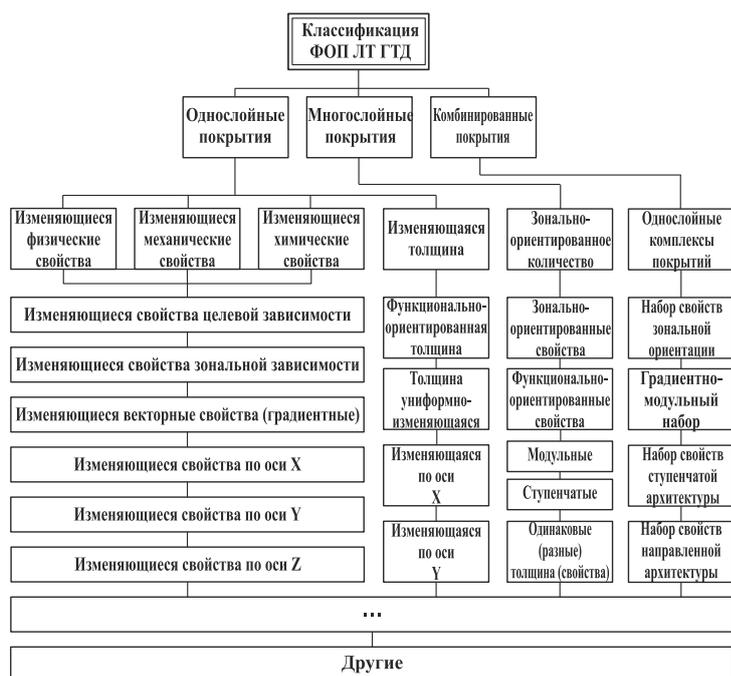


Рисунок 1. Классификация ФОП для ЛТ ГТД.

аспекты или же классификации, например, классификация основных эксплуатационных воздействий, или ориентированная классификация ЛТ ГТД, классификация основных методов, применяемых для повышения качества лопаток и т. д. [1, 3, 4]. Общее множество таких информационно-аналитических (интеллектуальных) источников разумно дополняет классификация ФОП для ЛТ ГТД (рис.1).

Вариант классификации ФОП, выполнен следующим образом:

- однослойные покрытия;

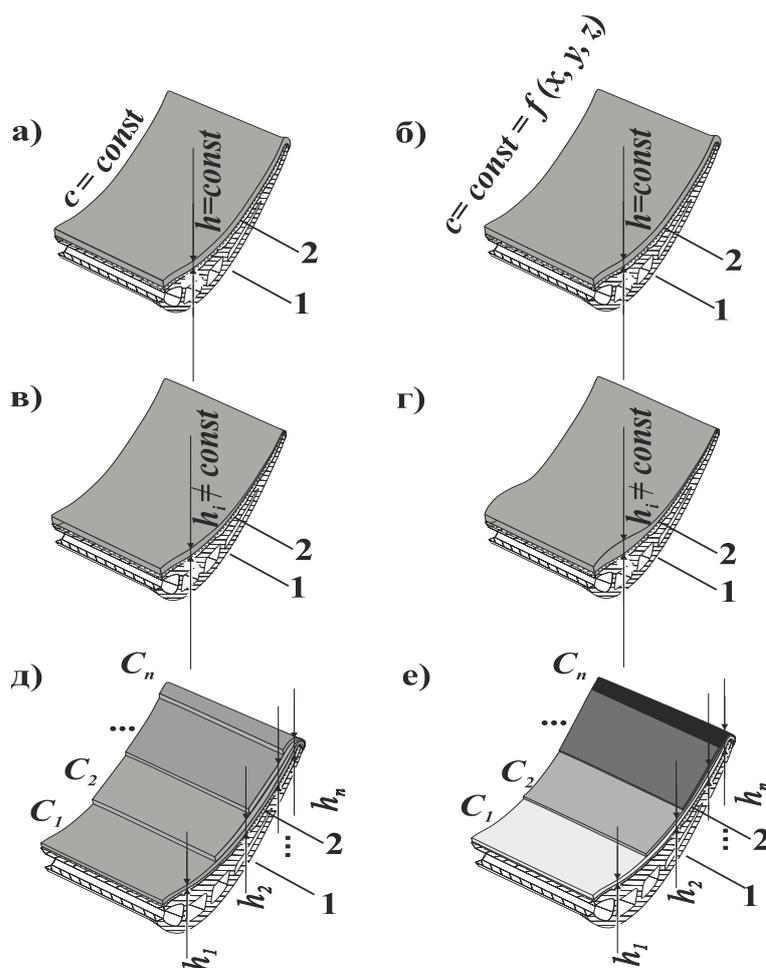


Рисунок 2. Варианты нанесения ФОП ЛТ ГТД, где:  
 а – однослойное покрытие с постоянными толщиной и свойствами; б – однослойное покрытие постоянной толщиной и переменными свойствами; в - однослойное покрытие равномерно переменной толщины и постоянными свойствами; г - однослойное покрытие неравномерно изменяющейся толщины и постоянными свойствами; д – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины (свойствами); е - зонально-многослойное (многомодульное) покрытие со слоями неодинаковой толщины (свойствами).

Так же, для обеспечения разно уровневой равно эффективной защиты (далее – ОРРЗ) ЛТ ГТД, в связи наличием неравномерности износа функциональных элементах лопатки, об этой особенности говорилось в начале статьи, можно применять однослойные покрытия изменяющейся толщины различных вариаций:

- функционально-ориентированная толщина;
- толщина равномерно-изменяющаяся;
- изменяющаяся толщина по оси x (y);
- другие свойства.

- многослойные покрытия;
- комбинированные покрытия.

Однослойные ФОП, например – это покрытия с изменяемой толщиной и изменяемыми физическими, химическими и механическими свойствами. При этом, однослойные ФОП с изменяющимися свойствами могут иметь различную пространственную (функциональную) ориентацию:

- изменяющиеся свойства целевой зависимости;
- изменяющиеся свойства зональной зависимости;
- изменяющиеся векторные свойства (градиентные);
- изменяющиеся свойства по осям координат x,y,z;
- другие свойства.

Можно рассмотреть некоторые варианты нанесения ФОП ЛТ ГТД (рис. 2), где: 1 – фрагмент пера лопатки; 2 – повреждение элемента пера лопатки;  $C, C_1, C_2, \dots, C_n$  – слои покрытия;  $h, h_1, h_2, \dots, h_n$  – толщина покрытия.

Наряду с однослойными покрытиями, для повышения ресурса ЛТ ГТД применимы многослойные покрытия, имеющие специальные свойства, а именно:

- зонально-ориентированное количество слоёв;
- зональная структура свойств каждого слоя;
- функциональная структура свойств каждого слоя;
- модульные ориентации свойств;
- ступенчатая ориентация свойств;
- одинаковые свойства (толщина) во всех слоях;
- разные свойства (толщина) во всех слоях;
- другие свойства.

Но более пристальное внимание необходимо уделить возможности применения комбинированных покрытий, которые позволяют, обеспечить соблюдения принципа ОРРЗ от комплексного неоднородного воздействия (абразив, температура, химические примеси, диффузия и т.д.) на лопатки турбины.

Комбинированные покрытия для повышения ресурса ЛТ ГТД, наиболее применимы при наличии условий сложно структурированных эксплуатационных нагрузок и могут иметь следующие структуры:

- однослойные комплексы покрытий;
- покрытия с набором свойств зональной ориентации;
- покрытия с набором свойств градиентно-модульной ориентации;
- покрытия с набором свойств ступенчатой архитектуры;
- покрытия с набором свойств направленной архитектуры;
- другие свойства.

Таким образом, имея информационный ресурс в виде рассмотренной в классификация ФОРП (рис. 1), можно обеспечить выполнение одного из промежуточных этапов синтеза специальной технологии повышения ресурса ЛТ ГТД, разработать гипотетические структурные варианты ФОРП, с возможностью выбора вариаций специальных покрытий и материалов для их нанесения как основы способа повышения ресурса ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированного подхода.

## **2. Разработка способа повышения ресурса ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированного подхода.**

В нашей работе предлагается, сформировать технологический процесс по нанесению защитных покрытий на ЛТ ГТД, например, способом детонационного напыления. Детонационное напыление – это процесс нанесения защитных покрытий, путём разогрева и разгона порошкообразного материала (смеси) энергией взрыва газа. Процесс имеет управляемую последовательность детонаций, что является основой для формирования структуры и размерности покрытий. Инициирование взрыва газовой смеси происходит за счёт искры на свече, поступающий в камеру сгорания газ мгновенно воспламеняется, разогревает и разгоняет подаваемый в ствол пушки дозированной порошок. Разогретая порошковая смесь разгоняется по стволу по направлению к обрабатываемой ЛТ ГТД и вбивает сформировавшиеся частицы в поверхность, при этом формируется плотная структура покрытия. Вовремя детонации скорость частиц превышает скорость звука, достигая (в зависимости от состава газовой смеси) от 420 м/с до 1300 м/с и более, а температура доходит до точек плавления материалов порошков и основы – 1500...4000 °С [5]. При столкновении расплавленного материала происходит ударное прессование на молекулярном уровне и порошок прочно соединяется с

поверхностью детали. Необходимая толщина покрытия формируется продолжительностью последовательных детонаций.

Достоинствами данного покрытия являются: низкая пористость покрытия, высокая прочность связи с основой обрабатываемой детали, незначительное термическое воздействие, позволяющее избегать нежелательных термонапряжений и коробления

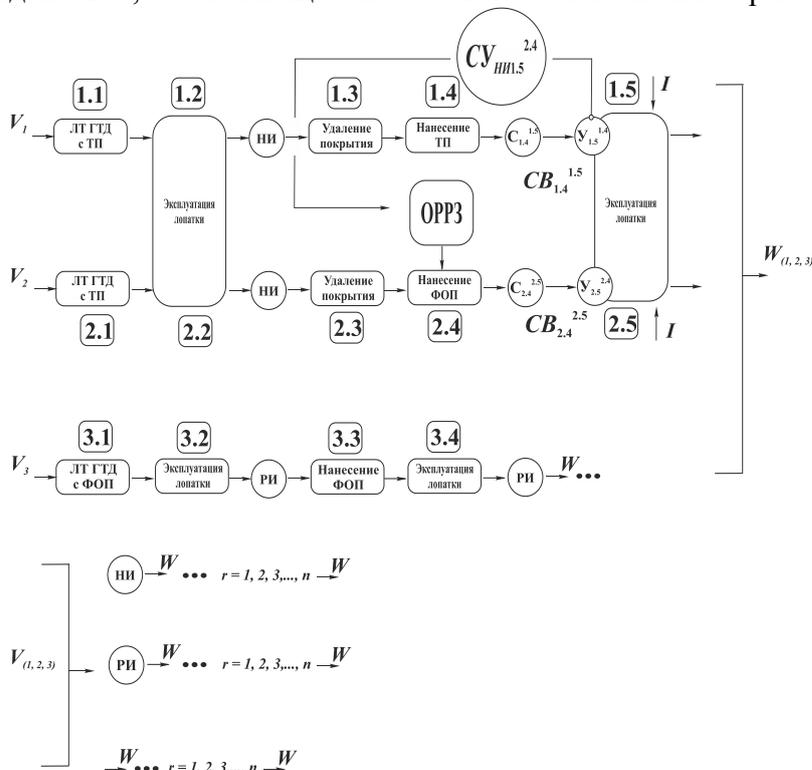


Рисунок 3. Схемы технологических процессов ремонта и изготовления ЛТ ГТД.

температуре горения и упрощаем процесс получения большого количества энергии, усложняя композицию материалов для литья, мы получаем прочный инструмент и упрощаем процесс воздействия им на материалы и процесс его содержания, а усложняя пространственную композицию материалов и количество слоёв защитного покрытия ЛТ ГТД мы повышаем ресурс лопаток, упрощая процесс эксплуатации и ремонта двигателя в целом.

Анализ данного вывода, возможно, провести на базе представленных вариантов технологических процессов (рис. 3.), где  $V_1, 2, 3$  – варианты технологических процессов (традиционный, нанесение ФОП на этапе ремонта, нанесение ФОП на этапе изготовления); НИ – неравномерный износ; РИ – равномерный износ; ТП – традиционное покрытие; ФОП – функционально-ориентированное покрытие; ОРРЗ – принцип обеспечения равноуровневой равноэффективной защиты;  $СУ_{НИ1.5}^{2.4}$  – связь управления процессом повышения ресурса объекта;  $СВ_{1.4}^{1.5}, СВ_{2.5}^{2.4}$  – связи взаимодействия при обеспечении целевой функции;  $C_{1.4}^{1.5}, C_{2.5}^{2.4}$  – свойства лопатки (покрытия) обеспечивающие выполнение технических функций,  $У_{1.4}^{1.5}, У_{2.4}^{2.5}$  – условия эксплуатации;  $r = 1, 2, 3, \dots, n$  – количество циклов восстановления.

даже тонкостенных деталей сложной конструкции [6]. Однако главное что должно соблюдаться при нанесении защитного покрытия, это его функциональное ориентирование на условия эксплуатации, т.е. создание покрытия особых форм и пропорций на поверхности детали [3].

Такое условие может определяться ещё одним принципом, так скажем, обратной пропорциональности. Например, выражение «от простого к сложному» можно интерпретировать в подход «простота в сложном». Например, в частности, усложняя состав топлива мы выигрываем в

Если быть более точным то, обеспечивая выполнение указанных принципов путём использования многослойных ФОП (модулей) можно исключить из технологического процесса такие этапы как сложный ремонт лопаток, сложное снятие старого (разрушившегося не по всей поверхности) покрытия имеющего повышенную (химическую, термическую, механическую) прочность, а это довольно энергоёмкие, трудоёмкие и материалоёмкие мероприятия, которые сопровождаются серьёзным контролем над качеством выполнения и требуют высококвалифицированного сопровождения каждого действия.

Одним словом, гораздо более эффективно повышать ресурс ЛТ ГТД, за счёт нанесения ФОП на этапе изготовления лопатки, в отличие от традиционного подхода, т.е. эксплуатации лопаток со стандартным равномерным однослойным покрытием в течение запланированного ресурса с последующим сложным ремонтом или вообще утилизации.

На данных рисунках показано соотношение объёмов составных частей (операций) синтеза технологического процесса в каждом возможном варианте. Анализируя первую схему, представленную на рисунке 3 (вариант  $V_1$ ), следует обратить внимание, на то, что в случае традиционного нанесения защитных покрытий определённые нами особенности эксплуатации приводят к неравномерному изнашиванию (НИ) покрытия. В тоже время проводимая исследователями аналитика проблем в данной сфере условно создаёт потоки информации  $I$  из общей системы анализа, которые так же условно создают управляющие связи  $СУ_{НИ.5}^{2,4}$ , т.е. дают толчок к разработке технологий, которые способны предать ЛТ ГТД новые специальные свойства и сократить (распределить) часть интеллектуальных, энергетических и материальных затрат.

Изучая схему вариант  $V_2$ , представленную на рисунке 3, технологические преобразования, указанные под номерами 2.1, 2.2, 2.3  $\leftrightarrow$  1.1, 1.2, 1.3. Также, аналогичны результаты эксплуатации, появление неравномерного износа (НИ), и только последующие действия, связанные с возобновлением работоспособности детали опираясь на принцип ОРРЗ ЛТ ГТД, что возможно за счёт нанесения ФОП. Такой технологический процесс более перспективен по отношению с процессом на рис. 3 (вариант  $V_1$ ), тем, что сокращает в последующем, после первого восстановления, сложную предварительную обработку лопатки, связанную со снятием не окончательно разрушившегося защитного покрытия и предотвращает разрушение тела детали, т.е. увеличивает количество циклов восстановления

Схема технологического процесса (вариант  $V_3$ ), рассматриваемая на рис. 3, является наиболее рациональной, так как на этапе изготовления лопаток применяется ФОП, что следует принципу ОРРЗ, и что позволяет максимально увеличить количество циклов эксплуатация – восстановление. В данном случае свойства лопатки соответственно сориентированы на условия эксплуатации, и можно сказать, равны. Постоянство равенства поддерживается аналитическим ресурсом гипотетической системы анализа – научными изысканиями, происходящими в области повышения ресурса деталей авиационных двигателей, в свою очередь необходимость которых определяется межобъектовыми и внутриобъектовыми связями в сфере или в обществе в целом.

И так учитывая вышеизложенное, можно перейти к рассмотрению непосредственно самого технологического процесса повышения ресурса ЛТ ГТД.

Весь этот процесс может быть разделён условно на несколько основных стадий.

1-я стадия – подготовка ЛТ ГТД к напылению покрытия;

2-я стадия – напыление покрытия (ФОП, традиционное) на функциональные элементы ЛТ ГТД;

3-я стадия – обработка функциональных элементов ЛТ ГТД после напыления покрытий.



Рисунок 4. Процесс нанесения покрытия на ЛТ ГТД и его основные стадии и операции.

Каждая стадия процесса (рис. 4), где  $n$  – мощность множества вариантов покрытий, объединяющихся в модуль (модули) в свою очередь может делиться (охватывать) на технологические операции такие как:

Технологические операции 1-й стадии:

- удаление неравномерно изношенного покрытия (химические способы – рыхление или травление, механические способы – шлифование), контроль состояния поверхности;

- отделочная обработка функциональных элементов ЛТ ГТД (энерго-механические способы – детонационная пескоструйная обработка и т.д.).

Технологические операции 2-й стадии:

- операции по напылению покрытий (активация поверхности) на функциональные поверхности (части, элементы, зоны) ЛТ ГТД используя различные материалы.

Применяемые в этом процессе покрытия, как рассматривалось ранее, могут быть однослойными, многослойными, комбинированными, а нанесение ФОП на этапе изготовления или, в крайнем случае, ремонта является наиболее рациональным способом повысить ресурс ЛТ ГТД и упростить процесс эксплуатации лопаток применяя сложноструктурированные многокомпонентные, многослойные (модульные) покрытия.

Технологические операции 3-й стадии технологического процесса являются вариативными, т.е. в зависимости от требований, предъявляемых к поверхностям детали, данная стадия может быть исключена из процесса по решению технолога.

Так в случае с детонационным напылением, которое имеет шероховатость  $R_a \approx 1,5 \dots 0,8$  мкм, возможна вероятность не выполнения окончательной механической обработки при условии, что детали будут использоваться в среде, где приоритетом будет осуществление защиты от термического воздействия, эрозии и т. д.

В продолжении следует отметить, что одним из ключевых шагов в алгоритме создания способа повышения ресурса ЛТ ГТД, является создание гипотетических (базовых) вариантов структурных схем ФОП ЛТ ГТД. Такие варианты структурных схем покрытий могут предполагать наличие нескольких типов, как например, однослойное *ЕЕН* – покрытие наносится как единовременно-единовременное непрерывное и многослойное *ЕЕП* – покрытие наносится как единовременно-единовременное прерывное

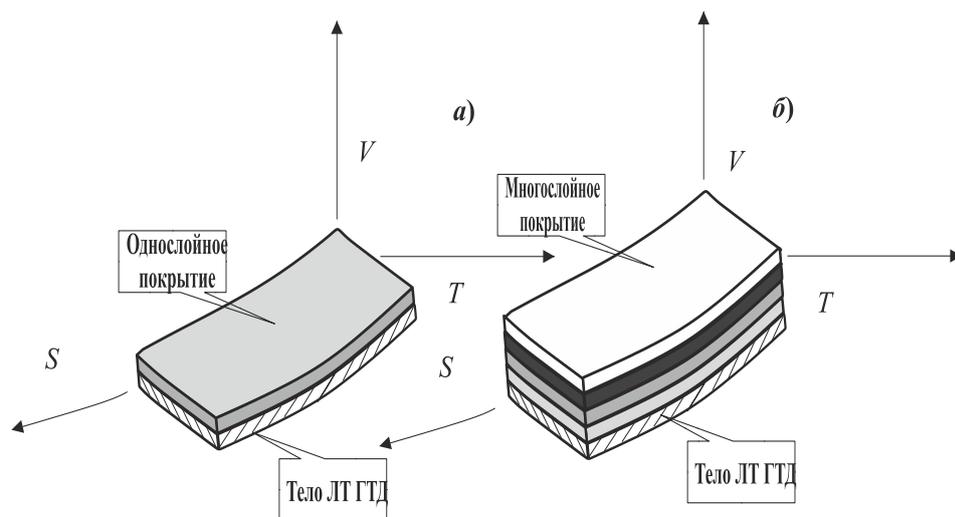


Рисунок 5. Структурные варианты покрытий для ЛТ ГТД:  
**а) покрытие типа ЕЕН, б) покрытие типа ЕЕП**

(рис. 5). Имеется ввиду, что слой покрытия на функциональный элемент (зону) напыляется в направлении  $S_i$  *Т* единовременно, а в направлении  $V$  непрерывно в случае *ЕЕН*, а в случае *ЕЕП* в направлении  $S_i$  *Т* единовременно, а в направлении  $V$  прерывисто [2].

Учитывая, что детонационные покрытия априори считаются многослойными[5] то для нашего исследования более приемлемо рассматривать вариант многослойного (модульного) покрытия, которое должно обеспечить защиту от диффундирования элементов между металлом и защитным покрытием, разгара защитного покрытия с последующим разрушением, защиту покрытия от разрушения при воздействии на него механических частиц и т.д. Но при нанесении следует учитывать тот факт, что ЛТ ГТД – это деталь со сложной геометрической формой, и защитное покрытие которое необходимо наносить так же при напылении будет принимать, можно сказать трёхмерную структуру.

Математическое отображение процесса нанесения многослойного покрытия может в общем иметь вид[2].

$$V_{M_{\square}} \rightarrow \bigvee_{v=1}^n \left\{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), \left( \bigwedge_{i=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{i=1}^{\infty} dl_t \times dl_v \right) \right\}, \quad (1)$$

где  $V_M$  – обозначение многослойного покрытия типа *ЕЕП*;  
 $n$  – число слоев различных покрытий;  
 $\vee$  – дизъюнкция (алгебра логики) обозначающая прерывистость процесса напыления покрытия в направлении  $u$ .

Объединив рассмотренные выше условия, схемы и предложения, а также учитывая такой немаловажный фактор, как контроль ориентации поверхностей (частей, зон) лопатки относительно угла воздействия потока частиц наносимого материала (угол обстрела поверхности не менее  $45^\circ$ ), опираясь также на предложенные в [1, 2] особые принципы ориентации технологических воздействий, можно перейти к созданию варианта схемы нанесения *ФОП*, учитывая особенности разрушения и изученные технологические воздействия на элементы лопатки.

Результатом создания такой схемы, может быть, как пример напыление покрытия, которое, как и деталь, что рассматривается в данной работе, приобретёт сложную геометрическую (пространственную) форму при условии многослойности и разнокомпонентности. Такая схема или один из вариантов схем, в сущности, является частью процесса придания ЛТ ГТД специальных ориентированных свойств и придания, ей требуемого потенциала, который повысит ресурс двигателя в целом.

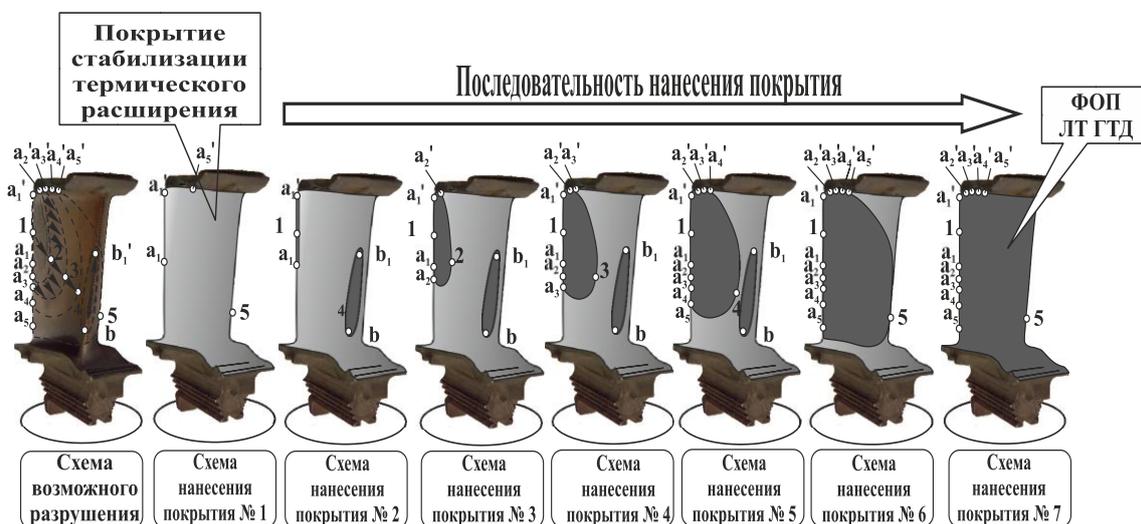


Рисунок 6. Схема нанесения многослойного детонационного покрытия на ЛТ ГТД.

Схематически нанесения многослойного детонационного *ФОП* ориентированно на особенности эксплуатации может выглядеть следующим образом (рис. 6).

На данной схеме, видно несколько поверхностей, на которых происходит разрушение в виде плоских и объёмных геометрических форм (линий, прямоугольников,

эллипсов и т.д.). Можно определить, что для данного случая разрушению подвержены три функциональных элемента входная кромка, выходная кромка и корыто. На кромках распространение разрушения покрытия происходит одновременно в разных направлениях, начало полного разрушения покрытия и основного металла на выходной кромке пера имеет вид широкой линии  $a_1 - 1 - a_1$ , далее повреждение покрытия расширяется до поверхности корыта  $a_2 - 2 - a_2 - a_1 - 1 - a_1 - a_2$  и так разрушение происходит до поверхности, обозначенной как  $a_5 - 5 - a_5 - a_4 - a_3 - a_3 - a_1 - 1 - a_1 - a_2 - a_3 - a_4$  охватывающей входную кромку. Дополнительно на поверхности входной кромки просматривается разрушение покрытия в области имеющей форму неправильного эллипса,

следовательно, можно локализовать поверхность разрушения, обозначив её  $b - b_1 (b_1)$  (область по решению технолога может увеличиваться, уменьшаться, изменять направление, форму и т.д.). Такой геометрический набор характерен только для данного случая, обусловленного видом ЛТ ГТД, материалом самой лопатки, материалом покрытия, методами нанесения покрытия, продолжительностью эксплуатации и т.д.

Учитывая это, наша работа в целом направлена на проектирование такого технологического который способен обеспечить повышения ресурса ЛТ ГТД различных машин. Это могут быть как двигатели летательных аппаратов (самолётов, вертолётов и т.д.) так и двигатели наземных машин (танк Т-80 с силовой установкой ГТД-1000Т и его модификации), а также установки топливно-энергетических сетей (SGT300 Tempest, SGT 100 -1S и т.д.).

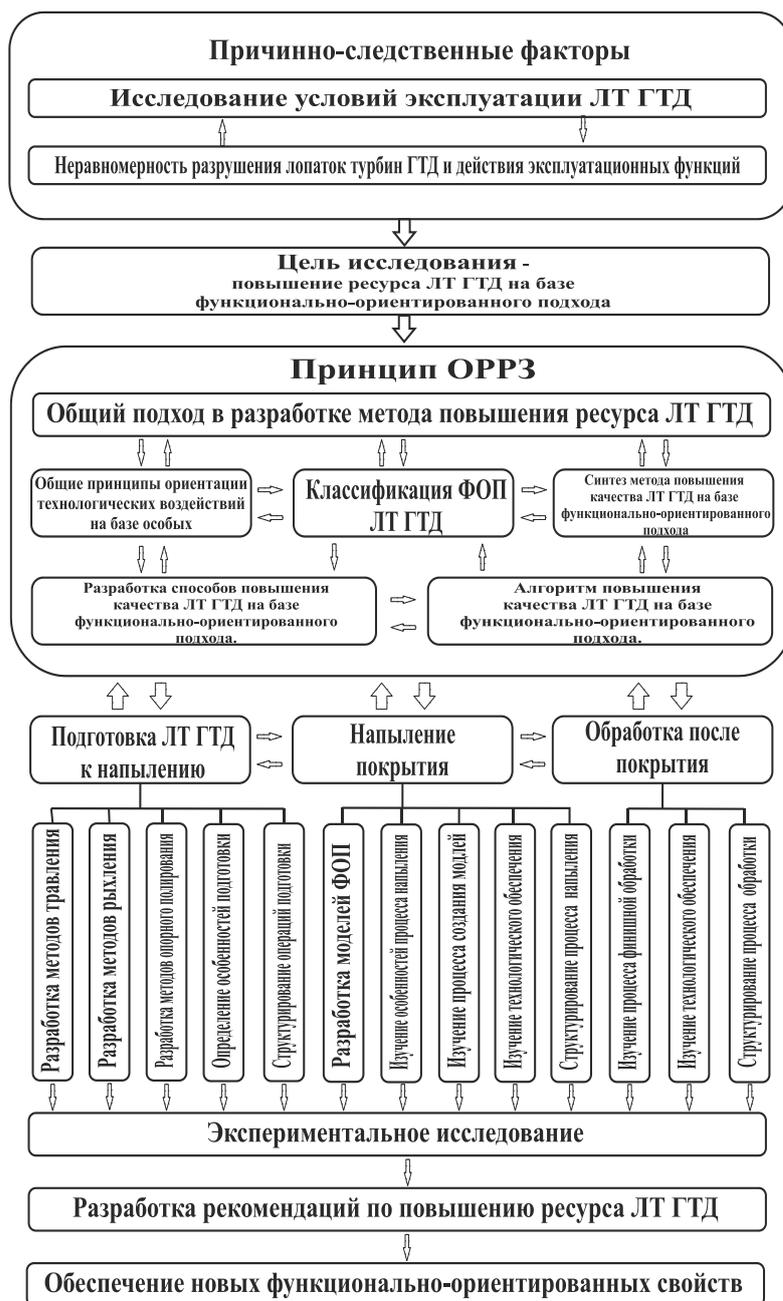


Рисунок 7. Блок-схема процесса исследования.

На основании рассмотренных особенностей повреждения традиционного защитного покрытия можно сформировать структуру и последовательность нанесения ФОП на ЛТ ГТД.

### **3. Составление общей блок-схемы исследования проводимого с целью повышения ресурса ЛТ ГТД**

Исследование процесса повышения ресурса ЛТ ГТД – это совокупность последовательных и параллельных интеллектуальных и практических подпроцессов, стадий, этапов, операций и т.д. Качество условий труда, своевременность обеспечения, результативности исследования закладываются в сам процесс ещё на этапе планирования. С этой целью предлагается рассмотреть блок-схему (рис.7) планирования общего процесса исследования по повышению ресурса ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированного подхода. Указанная схема может состоять из множества пунктов, обозначающих операции, действия и т.д., перечень которых в свою очередь будет определяться в зависимости от требований условий в которых проводится исследование.

Блок-схема сокращённо содержит следующие пункты:

- исследование особенностей разрушения ЛТ ГТД;
- исследование действующих эксплуатационных функций;
- анализ существующих технологических методов, применяемых для повышения качества лопаток турбины;
- разработка общего подхода метода повышения ресурса;
- классификация ФОП;
- синтез метода повышения ЛТ ГТД;
- составление алгоритма синтеза процесса.

Так же в состав данной блок-схемы входят:

- создание структуры синтеза процесса восстановления или напыления ФОП изучение;
- планирование технологического процесса;
- обеспечение технологического процесса;
- разработка методов каждой стадии технологического процесса;
- структурирование каждой операции в отдельности и в общем;
- проведение эксперимента;
- разработка рекомендаций по повышению ресурса ЛТ ГТД;
- внедрение результатов работы в производство;
- обеспечение новых функционально-ориентированных свойств.

### **4. Выводы**

В ходе проведённой работы была проведена следующая работа:

1. Изучена и предложена классификация ФОП для ЛТ ГТД, которая позволит на промежуточном этапе синтеза специальной технологии повышения ресурса ЛТ ГТД, разработать гипотетические структурные варианты ФОП, как основы способа повышения ресурса ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированного подхода.

2. Разработан подход как основа способа повышения ресурса ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированной технологии, сформирована структура и последовательность нанесения ФОП на ЛТ ГТД, с учётом особых принципов ориентации технологических воздействий.

3. Предложена блок-схема общего процесса исследования по повышению ресурса ЛТ ГТД на базе функционально-ориентированного подхода, с целью повышения ка-

чество условий труда, всестороннего обеспечения и прогрессивности результатов исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А. Н. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационных двигателя на базе функционально-ориентированной технологии / А. Н. Михайлов, Т. В. Хавлин // Международный сборник научных трудов / «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2017. – №1. – С. 84-100.

2. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 347с. – ISBN 966-7907-24-4.

3. Хавлин, Т. В. Исследование особенностей разрушения лопаток турбин авиационных двигателей [Электронный ресурс] / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, А.П. Недашковский, В. В. Ткач, Е. С. Зиборов // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий: сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., почётного профессора ДГТУ А. П. Бабичева (Ростов-на-Дону, 27 - 28 февраля 2018 г.) / Донской гос. техн. унт. – Электрон. тестовые данные. – Ростов-на Дону: ДГТУ, 2018. – С.182-185.

4. Хавлин, Т. В. Разработка метода повышения ресурса лопаток турбины вертолетного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, С. В. Глухов // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 22-25 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, – 2018. – С. 136-139.

5. Бартенев, С. С. Детонационные покрытия в машиностроении. / С. С. Бартенев, Ю. П. Федько, А. И. Григоров – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982. – 215 с. ил.

6. Ненашев, М. В. Перспективные технологии, свойства и применение детонационных покрытий /М. В. Ненашев, С. Ю. Ганигин, А. Н. Журавлев, А. С. Дьяконов, С. А. Белокозовкин, Д. Ю. Карякин // Вестник Самарского Государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. КОРОЛЁВА (национального исследовательского университета) № 3 (27) Часть 1 2011. – Самара: Издательство "Самарский университет", 2016 – С. 197-202.

Поступила в редколлегию 13.02.2019 г.