

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц.

Донецкая академия гражданской защиты МЧС ДНР, г. Донецк, ДНР

Тел.: +38 071 3821135, E-mail: dmitry.michailov@mail.ru

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЫ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Исследованы основные характеристики абразивно-эрозионного износа элементов рабочих лопаток компрессора. Рассмотрены вопросы интегрированного технологического инжиниринга параметров при синтезе функционально-ориентированных свойств структуры лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Представлены особенности реализации технологического инжиниринга в обеспечении функционально-ориентированных свойств структуры лопаток компрессора, даны общие понятия и определения. Процесс обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры лопаток газотурбинного двигателя выполнен на базе специальных многослойных покрытий.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки, функционально-ориентированные покрытия, эксплуатация, износ лопаток, технология, свойства, технологический инжиниринг.

D. A. Mikhaylov

INTEGRATED TECHNOLOGICAL ENGINEERING OF PARAMETERS IN THE PROCESS OF SYNTHESIS OF FUNCTIONAL-ORIENTED PROPERTIES OF THE STRUCTURE OF BLADES GAS TURBINE COMPRESSOR

The main characteristics of abrasive-erosive wear of the elements of the compressor blades are investigated. The issues of integrated technological engineering of parameters in the synthesis of functionally oriented properties of the structure of the compressor blades of a gas turbine engine are considered. The features of the implementation of technological engineering in providing functionally oriented properties of the structure of compressor blades are presented, general concepts and definitions are given. The process of providing functionally-oriented properties of the structure of the blades of a gas turbine engine is made on the basis of special multilayer coatings.

Key words: gas turbine engine, blades, functionally oriented coatings, operation, blade wear, technology, properties, process engineering.

1. Введение

Авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой сложную систему, состоящую из множества различных подсистем, предназначенных для реализации заданных эксплуатационных функций. При этом основной его составляющей является компрессор, который структурирован из нескольких множеств различных лопаток, дисков и других элементов. Например, ГТД серии ТВЗ-117, содержит группу рабочих лопаток ротора, расположенных на 12 ступенях компрессора, группу поворотных лопаток входного направляющего аппарата, группу поворотных лопаток направляющего аппарата, группу неподвижных лопаток направляющего аппарата и группу лопаток спрямляющего аппарата. Поэтому в целом, компрессор ГТД имеет сложную структуру, состоящую из множеств (групп) различных по назначению лопаток и специальных элементов, выполняющих заданные эксплуатационные функции [1, 2, 3].

Можно отметить, что при эксплуатации ГТД в компрессоре на лопатки каждой группы действуют свои эксплуатационные функции, которые обусловлены абразивно-эрозионным, физическим, химическим, солевым и другими видами износа и разрушения рабочих поверхностей лопаток. При этом износ лопаток компрессора зависит от

состава воздушно-пылевой среды, проходящей по проточной части двигателя, расположения лопаток по ступеням компрессора, геометрии каждой лопатки ступени, кинематики движения лопаток и других параметров [1, 2, 3].

Выполненные исследования [4] позволили установить, что износ системы лопаток компрессора имеет определенные особенности, характеризующиеся неравномерными износами следующих родов:

- неравномерности износа лопаток первого рода, возникающие на поверхностях каждой лопатки (например, поверхность корыта лопатки);
- неравномерности износа лопаток второго рода, возникающие по лопаткам каждой группы (например, по группе рабочих лопаток);
- неравномерности износа лопаток третьего рода, возникающие по лопаткам групп (например, между группами рабочих лопаток, входного направляющего аппарата, направляющего и спрямляющего аппарата).

Приведенные неравномерности значительно снижают эксплуатационные показатели лопаток и ГТД в целом. Для повышения ресурса лопаток в работе [5] предлагается обеспечивать функционально-ориентированные свойства (ФОС) [6] их элементов, в том числе с помощью функционально-ориентированных покрытий (ФОП) [7, 8, 9].

Можно заметить, что ФОС лопаток компрессора ГТД с помощью ФОП обеспечивают значительное повышение ресурса, ремонтпригодности, эксплуатационного потенциала авиационного двигателя. Вместе с тем, вследствие того, что в процессе эксплуатации ГТД лопатки компрессора структурированы в группы и имеют неравномерные износы лопаток 3-х родов, необходим специальный подход в формировании ФОС по структуре лопаток компрессора. Этот подход в этой работе основывается на базе интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях действия неравномерностей 3-х родов.

Целью данной работы является повышения эксплуатационных свойств ГТД посредством обеспечения ФОС структуры лопаток компрессора, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, на основе интегрированного технологического инжиниринга параметров эксплуатационных, физико-механических и технологических свойств структуры лопаток на базе специального технологического обеспечения.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить анализ особенностей эксплуатации лопаток компрессора ГТД; представить основные положения интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС структуре лопаток компрессора ГТД на базе ФОП; выполнить анализ общих особенностей интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС структуры лопаток компрессора ГТД; представить особенности синтеза интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуры лопаток компрессора.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Анализ особенностей эксплуатации лопаток компрессора ГТД

Проведенные исследования позволили установить, что при эксплуатации ГТД, по проточной части компрессора происходят изменения основных параметров потока в соответствии с графиками, представленными на рис. 1. Здесь, показана зависимость параметров потока проточной части компрессора: график 1 – давление, график 2 температура, график 3 скорость.

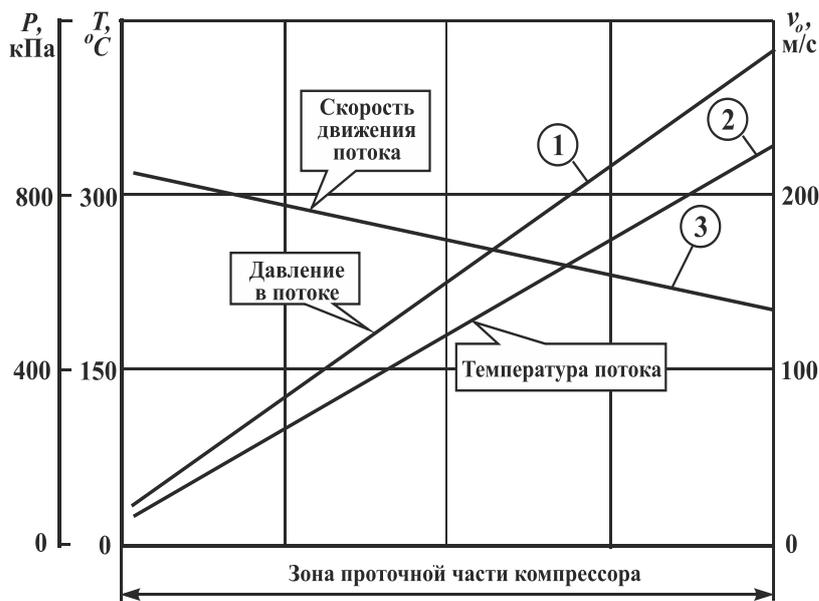


Рисунок 1. Зависимость эксплуатационных параметров потока в проточной части компрессора: 1 – давление, 2 – температура, 3 – скорость

Анализ представленных графиков позволил установить, что по длине проточной части компрессора происходит значительное изменение параметров потока, геометрии поперечного сечения и концентрации пыли и абразива по высоте лопаток. При этом реализуется концентрация частиц пыли и песка на периферии у корпуса компрессора (рис. 2).

На рис. 2 представлена структурная схема лопаток проточной части компрессора и эпюры концентрации частиц пыли. Здесь показано: рис. 2, а – структурная схема лопаток компрессора, рис. 2, б – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток статора, рис. 2, в – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ротора. При этом лопатки компрессора структурированы в следующие группы:

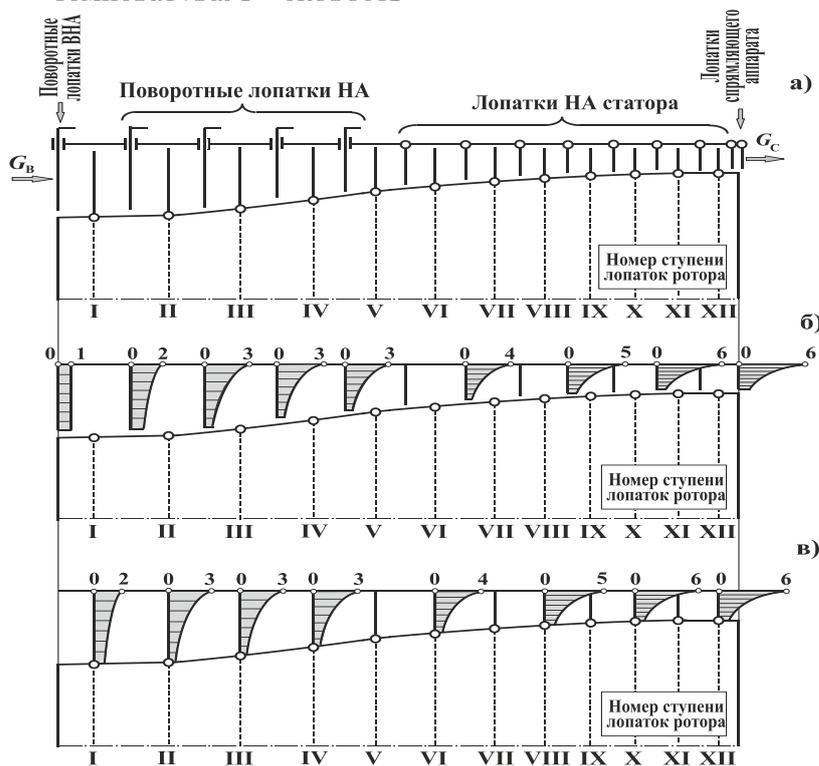
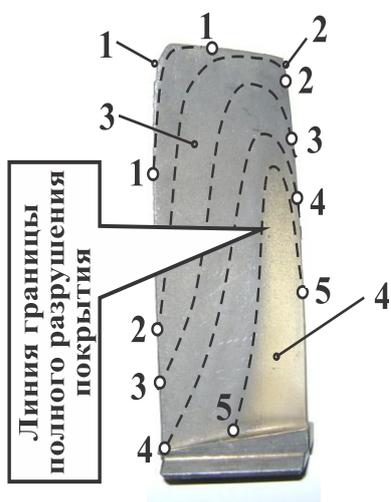


Рисунок 2. Структурная схема лопаток проточной части компрессора и эпюры концентрации частиц пыли: а – структурная схема лопаток компрессора, б – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток статора, в – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ротора

поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА); поворотные лопатки направляющего аппарата (НА); лопатки направляющего аппарата (НА) статора; лопатки спрямляющего аппарата, рабочие лопатки ротора (на рис. 2 представлены 12 ступеней ротора, эпюры концентрации пыли на

лопатках компрессора показаны частично не для всех ступеней).

Проведенный анализ особенностей концентрации пыли по лопаткам компрессора по длине его проточной части показал, что в компрессоре происходит сепарирование пыли к периферии корпуса компрессора. При этом концентрация пыли изменяется по высоте пера лопатки, по лопаткам группы и лопаткам групп. Это приводит к возникновению неравномерностей износа трех родов:



- неравномерность первого рода, возникающая на поверхностях каждой лопатки (например, на поверхности корыта лопатки);
- неравномерность второго рода, возникающая по лопаткам каждой группы (например, по группе рабочих лопаток);
- неравномерность третьего рода, возникающая по лопаткам групп (например, между группами рабочих лопаток, входного направляющего, направляющего и спрямляющего аппаратов).

Выполненный анализ действия этих неравномерностей износа лопаток показал, они имеют определенные закономерности, причем изменяющиеся по поверхностям каждой лопатки ступени, по лопаткам каждой группы и по лопаткам групп (лопаткам между группами).

Рисунок 3. Общий вид лопатки компрессора и схема неравномерного износа поверхности ее пера

На рис. 3 представлен общий вид рабочей лопатки компрессора и схема неравномерного износа поверхности ее пера. Здесь показано: 1 – лопатка компрессора, 2 – периферийная кромка лопатки, 3 – поверхность корыта (корытца) лопатки, 4 – опытное покрытие пера лопатки для выполнения анализа износа поверхностей пера. Линии 1-1, 2-2, ..., 5-5 являются изометрическими линиями износа поверхности, то есть равного по высоте износа поверхности в данный момент времени. В данном случае показаны изометрические линии износа для 5-ти промежутков времени износа лопатки. Обычно, эти линии строятся по равным промежуткам времени износа опытного покрытия лопатки каждой ступени компрессора. Для лопаток других групп износ их поверхности имеет другие особенности. Например, для лопаток направляющего аппарата (НА) износ поверхности имеет свои специфические особенности (рис. 4). На рис. 4 представлен общий вид лопаток НА: рис. 4, а – со стороны корыта, рис. 4, б – со стороны внутренней части бандажа. В этом случае процесс износа характеризуется повышенным износом у основания лопатки, то есть в месте ее крепления на бандаже.

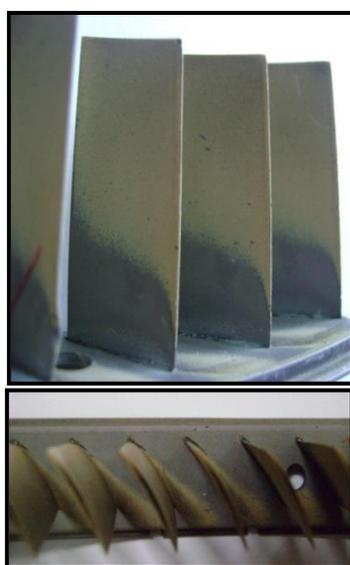


Рисунок 4. Общий вид лопаток НА: а – со стороны корыта, б – со стороны внутренней части бандажа

Таким образом, для выполнения ФОП лопаток необходимо проводить предварительный анализ эксплуатационных особенностей износа каждой лопатки, лопаток в группе и лопаток между группами. В данной работе этот

вопрос решается на базе интегрированного технологического инжиниринга в формировании ФОП по структуре лопаток компрессора.

3. Общие положения интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС структуры лопаток компрессора ГТД на базе ФОП

Интегрированный технологический инжиниринг в обеспечении ФОС лопаток компрессора ГТД заключается в комплексном определении особенностей износа структуры лопаток на этапе эксплуатации в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, установлении особенностей формирования ФОС по структуре лопаток (по поверхности лопатки, по лопаткам группы, по группам лопаток) в зависимости от действия эксплуатационных функций и возникающего износа, а также реализации технологии обеспечения ФОС структуры лопаток (рис. 5). Интегрированный технологический инжиниринг устанавливает связи и определяет параметры между этапами жизненного цикла лопаток, а именно: эксплуатация, формирование ФОС и реализация технологии. Интегрированный технологический инжиниринг в обеспечении ФОС (производственно-технические показатели) структуры лопаток компрессора ГТД это совместное композиционное определение параметров технологии обеспечения ФОС по структуре лопаток ГТД в зависимости от особенностей эксплуатации лопаток (неравномерности износа лопаток по структуре) и формирования их свойств - на основе общего критерия эксплуатационных показателей (равные, кратные, функционально-зависимые и другие свойства) по структуре лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R -родов [10].

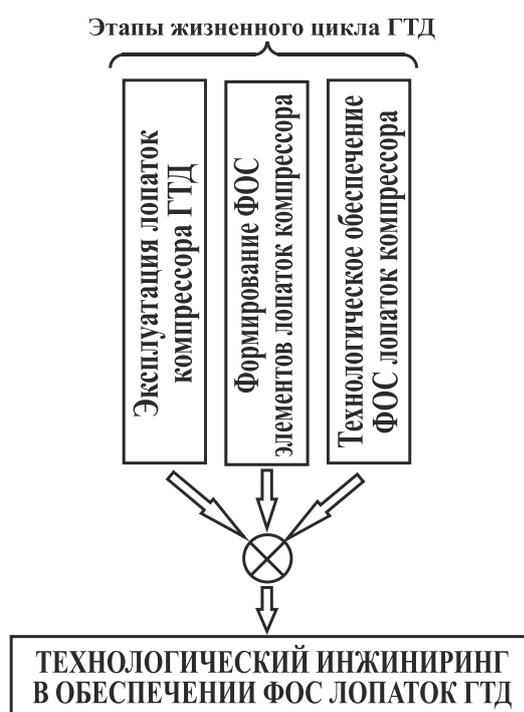


Рисунок 5. Состав этапов жизненного цикла ГТД при технологическом инжиниринге в обеспечении ФОС лопаток на базе ФОП

Можно отметить, что компрессор ГТД имеет сложную структуру лопаток, содержащих несколько групп различных лопаток, которые испытывают при эксплуатации действие неравномерных эксплуатационных воздействий трех родов, которые вызывают неравномерные износы элементов лопаток. Повышение ресурса каждой лопатки, лопаток в каждой группе и групп лопаток относительно друг друга в данной работе предлагается выполнять на базе многослойных ФОП, реализуемых с помощью вакуумных ионно-плазменных технологий (вакуумные нитрид титановые покрытия). Однако для формирования таких покрытий необходимы исходные данные, а именно следующие:

- необходимо знать особенности износа элементов каждой лопатки и структуры лопаток, характеризуемые действием неравномерностей износа структуры лопаток ГТД трех родов (интенсивность износа элементов поверхности каждой лопатки, лопаток в каждой группе, групп лопаток относительно друг друга; следует определить - какой образуется пространственный контур границ (ПКГ) износа поверхности лопатки во времени за заданные (равные) промежутки, в пе-

риод полной их эксплуатации; знать какие физико-механические свойства необходимо обеспечивать каждому слою покрытия; какая должна быть толщина каждого слоя покрытия и другие параметры);

- необходимо определить особенности формирования ФОС по элементам каждой лопатки и структуре всех лопаток; нужно установить принципы и условия формирования ФОС для ФОП по элементам каждой лопатки и по структуре всех лопаток; выполнить обеспечение ФОС с помощью ФОП по уровням: ФОП 1-го уровня, ФОП 2-го уровня; ФОП 3-го уровня;

- необходимо установить структуру и параметры технологического процесса (ТП) для реализации ФОП каждой лопатки; определить связи между отдельными технологическими процессами реализации ФОП по уровням обеспечения ФОС лопаток; разработать структуру многосвязного интегрированного технологического процесса

обеспечения ФОС на базе ФОП.

Можно отметить, что определение этих исходных данных в данной работе выполняется на базе интегрированного технологического инжиниринга параметров ФОП структуры лопаток компрессора ГТД. Интегрированный технологический инжиниринг в установлении начальных параметров обеспечения ФОС на базе ФОП заключается в совместном комплексном их определении по следующим этапам жизненного цикла ГТД (рис. 5): эксплуатация лопаток компрессора (определение параметров износа элементов структуры лопаток компрессора); формирование ФОС на базе ФОП элементов структуры лопаток компрессора; технологическое обеспечение ФОС на базе ФОП для всех составляющих структуры лопаток компрессора ГТД. На рис. 5 представлен состав этапов жизненного цикла ГТД, который реализуется при выполнении интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС на базе ФОП для всех элементов структуры лопаток компрессора ГТД.

Интегрированный технологический инжиниринг в обеспечении ФОС на базе ФОП заключается в комплексном определении исходных данных параметров износа элементов структуры лопаток на этапе эксплуатации лопаток компрессора ГТД для формирования их необходимых свойств с помощью ФОП в зависимости от уровней структуры лопаток компрессора на базе установленных параметров интегрированного многосвязного технологического процесса.

Таким образом, интегрированный технологический инжиниринг в обеспечении ФОС на

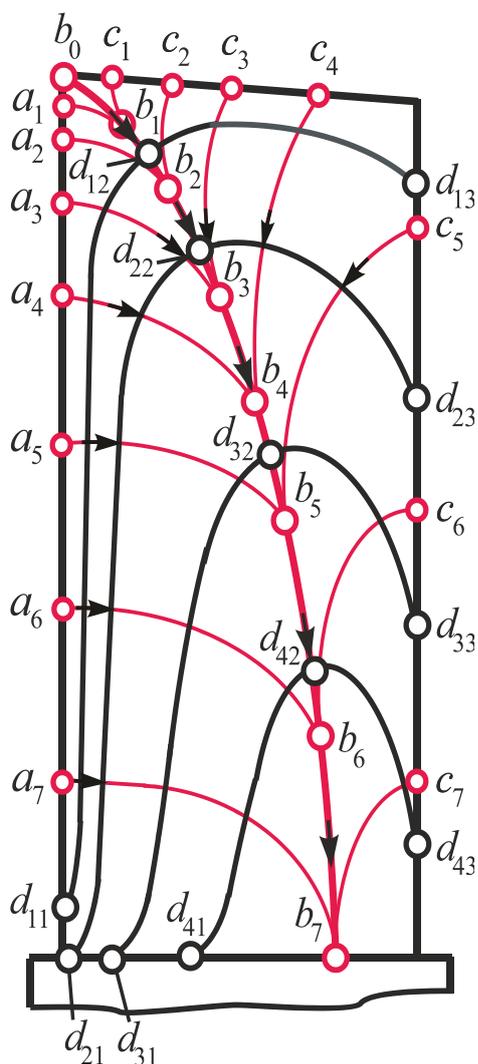


Рисунок 6. Схема абразивно-эрозионного износа пера рабочей лопатки компрессора ГТД

базе ФОП реализуется в три этапа [7]:

- I этап. На этапе эксплуатации лопаток ГТД определяются параметры износа рабочих поверхностей лопатки через равные промежутки времени в период назначенного ресурса ГТД. Для этого, до эксплуатации, на лопатки выполняется напыление опытного покрытия, аналогичного по своим физико-механическим свойствам и толщине эксплуатационному покрытию. В период эксплуатации лопаток, через равные промежутки времени выполняется фотографирование особенностей износа покрытия по поверхности пера лопатки. При этом на базе разработанной методики определяется пространственный контур границ (ПКГ) особенностей износа опытного покрытия (рис. 3, рис. 4, рис. 6) после каждого равного промежутка времени его износа. Устанавливается интенсивность износа опытного покрытия пера лопатки компрессора. Данные исследования проводятся по каждой лопатке, по лопаткам группы, по лопаткам между группами.

- II этап. На этапе формирования ФОС на базе многослойного ФОП определяются параметры физико-механических свойств каждого слоя, толщина каждого слоя многослойного покрытия, количество слоев многослойного покрытия - в зависимости от особенностей износа опытного покрытия. Выполняется составление структуры многослойного ФОП для каждой лопатки, для группы лопаток и для лопаток групп на базе общего критерия (равные, кратные, функционально-зависимые эксплуатационные свойства) распределения ФОС лопаток с помощью ФОП.

- III этап. На этом этапе составляется структура интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС на базе ФОП лопаток компрессора ГТД для каждой лопатки, для лопаток группы, для лопаток групп. При этом определяются технологические параметры интенсивности напыления покрытия каждого слоя многослойного ФОП каждой лопатки, лопаток группы, лопаток групп. В этом случае, на основании ПКГ износа опытного покрытия определяется ПКГ защитных экранов каждого слоя лопатки, ПКГ защитных экранов ФОП каждой лопатки, ПКГ защитных экранов для лопаток каждой группы и ПКГ защитных экранов для всех групп лопаток компрессора ГТД [11, 12].

Можно отметить, что на I этапе создания интегрированного технологического инжиниринга обеспечения ФОС на базе ФОП выполняются исследования особенностей износа поверхности пера лопаток. На рис. 6 представлена схема абразивно-эрозионного износа пера рабочей лопатки компрессора ГТД. Здесь, линией $d_{i1} d_{i2} d_{i3}$ обозначен i -й ПКГ износа поверхности пера лопатки. Это изометрическая линия износа – с равной толщиной износа поверхности. ПКГ износа обуславливает одинаковый износ (полный износ) опытного покрытия в i -й промежуток времени. В этом случае, ПКГ износа покрытия определяется через равные промежутки времени по назначенному ресурсу ГТД. Следует отметить, что градиент износа поверхности пера лопатки проходит по линии $b_0 b_1 b_2 b_3 \dots$. Левый градиент износа покрытия обозначен линиями $a_i b_i$, а правый градиент износа покрытия пера обозначен линиями $b_i c_i$. В целом, проведенные исследования износа покрытия пера рабочей лопатки 1-й, 2-й и 3-й ступеней, показал, что особенности износа опытного покрытия пера лопатки подобны волокнам пера опахала птицы. На основании этих исследований в работе [13] предложено формировать ФОС пера лопатки подобно свойствам опахала пера птицы, которые выполнены здесь на уровне изобретения.

Также можно отметить, что на этом этапе выполняются исследования особенностей износа лопаток в каждой группе компрессора и групп лопаток относительно друг друга. На основании этих исследований производится распределение ФОС по лопаткам

групп и по группам лопаток относительно друг друга, которое реализуется на II этапе интегрированного технологического инжиниринга обеспечения свойств лопаток. Далее, на III этапе определяются параметры интегрированного многосвязного технологического процесса, и разрабатывается необходимое технологическое обеспечение для реализации ФОС на базе ФОП всех групп лопаток компрессора ГТД.

4. Общие особенности интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС структуры лопаток компрессора ГТД

Следует отметить, что в условиях эксплуатации ГТД лопатки компрессора работают в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций и возникающих при этом неравномерных износов 3-х родов или *R*-родов (для всего ГТД) [4]:

- неравномерности износа лопаток 1-го рода, возникающие на поверхностях пера лопатки;
- неравномерности износа лопаток 2-го рода, возникающие по лопаткам группы (в ГТД серии ТВ3-117 – 5-ть групп лопаток);
- неравномерности износа лопаток 3-го рода, возникающие по лопаткам между группами.

В условиях наличия неравномерностей износа лопаток 3-х родов, необходимо обеспечивать ФОС структуры лопаток компрессора, а именно:

- ФОС 1-го уровня, которые позволяют компенсировать неравномерности износа 1-го рода (неравномерности по поверхности пера лопатки);
- ФОС 2-го уровня, которые позволяют компенсировать неравномерности износа 2-го рода (неравномерности по лопаткам каждой группы);
- ФОС 3-го уровня, которые позволяют компенсировать неравномерности износа 3-го рода (неравномерности по лопаткам групп).

Интегрированный технологический инжиниринг в обеспечении ФОС лопаток компрессора позволяет решать вопросы их формирования по структуре лопаток на базе следующих особенностей:

1. Процесс обеспечения производственно-технических свойств (ФОС) и эксплуатационных свойств структуры лопаток выполняется на базе **комплексных связей**, а именно:

- поэтапных связей, действующих по этапам жизненных циклов ГТД: эксплуатация, обеспечение ФОС и реализация технологии;
- структурных связей, действующих по структуре лопаток компрессора *R*-уровней (между элементами каждого уровня и между уровнями структуры);
- структурно-эксплуатационных связей, действующих по структуре лопаток на этапе их эксплуатации между параметрами износа *R*-родов (между элементами каждого рода износа и между родами структуры);
- структурно-свойственных связей, действующих по структуре лопаток на этапе формирования ФОС между параметрами обеспечения свойств *R*-классов (между элементами каждого класса свойств и между классами структуры ФОС);
- структурно-технологических связей, действующих по структуре лопаток на этапе реализации интегрированной многосвязной технологии между параметрами технологического процесса *R*-классов (между элементами каждого класса параметров технологии и между классами структуры технологии);
- итерационно-рекуррентных связей.

2. Обеспечение эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс и так далее) структуры лопаток *R*-уровня должно выполняться на базе **общего принципа**

или критерия, например, реализации равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств всех структурных элементов, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций R -родов и возникающих при этом неравномерных износов R -родов ее элементов.

3. Процесс распределения ФОС (производственно-технические свойства) по структуре лопаток компрессора R -уровня, работающих при неравномерном износе R -родов, должен выполняться на основе **общего условия** последовательного распределения ФОС по структуре лопаток ГТД в зависимости от особенностей износа элементов структуры, начиная сначала с элемента находящегося на уровне структуры, испытывающего максимальный износ, затем по элементам этого уровня, с последовательным уменьшением величины износа каждого элемента, далее, начиная с элемента следующего уровня, испытывающего меньший износ, чем максимальный износ элемента предыдущего уровня, но максимальный износ на этом уровне, затем по элементам этого уровня, с последовательным уменьшением величины износа каждого элемента, и так далее, до тех пор, пока не будут обеспечены ФОС всей структуры лопаток. При этом реализуются следующие ФОС структуры лопаток:

- ФОС лопаток 1-го класса;
- ФОС лопаток 2-го класса;
-
- ФОС лопаток R -класса.

4. Процесс обеспечения ФОС лопаток компрессора ГТД выполняется на базе **интегрированного многосвязного технологического процесса**, который структурируется следующим образом:

- комплексный связный технологический процесс обеспечения ФОС 1-го класса;
- комплексный связный технологический процесс обеспечения ФОС 2-го класса;
-
- комплексный связный технологический процесс обеспечения ФОС R -го класса.

са.

5. На базе интегрированного технологического инжиниринга обеспечения ФОС лопаток компрессора создаются следующие условия для реализации качественно новой совокупности свойств ГТД, а именно: обеспечивается качественно новая совокупность свойств лопаток компрессора; обеспечивается возможность повышения эксплуатационных и технико-экономических свойств; обеспечивается возможность в повышении эксплуатационного потенциала ГТД; обеспечивается возможность управления эксплуатационными свойствами ГТД на этапах обеспечения ФОС и реализации технологии; обеспечивается возможность реализации требуемого, заданного или предельного эксплуатационного потенциала ГТД.

Можно отметить, что на базе приведенных связей устанавливаются необходимые закономерности процессов и параметров, а это позволяет решать следующие практические задачи:

- устанавливаются закономерности износа структуры лопаток ГТД;
- устанавливаются закономерности параметров обеспечения ФОС по структуре ГТД в зависимости от особенностей износа лопаток;
- устанавливаются закономерности параметров интегрированного многосвязного технологического процесса в зависимости от износа структуры лопаток и обеспечения ФОС структуры лопаток компрессора;

- устанавливаются закономерности коррекции всех параметров в зависимости от изменяющихся особенностей эксплуатации, обеспечения ФОС и параметров технологии.

Следует заметить, что при обеспечении ФОС лопаток компрессора одной из главных характеристик ГТД является ресурс $C_k^g = R_k$. Это может быть установленный, межремонтный, назначенный и другие виды. При этом для обеспечения качественно новой совокупности свойств ГТД на базе ФОС структурных элементов необходимо реализовывать равный, кратный или функционально-зависимый ресурс. Это условие для лопаток компрессора ГТД можно представлять следующими выражениями [7, 8, 9]:

- для варианта структуры лопаток с равным ресурсом всех элементов

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_i = \dots = R_n = R ;$$

- для варианта структуры лопаток с кратным ресурсом всех элементов

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 = k_3 R_3 = \dots = k_i R_i = \dots = k_n R_n = R ;$$

- для варианта структуры лопаток с функционально-зависимым ресурсом всех элементов

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= f_1(R) ; \\ R_2 &= f_2(R) ; \\ R_3 &= f_3(R) ; \\ &\dots\dots\dots \\ R_i &= f_i(R) ; \\ &\dots\dots\dots \\ R_n &= f_n(R) , \end{aligned} \right\}$$

где R_i – ресурс i -го структурного элемента (лопатки компрессора);

k_i – коэффициент кратности для i -го структурного элемента;

n – общее количество лопаток компрессора ГТД;

$R_i = f_i(R)$ - функциональная зависимость ресурса i -го структурного элемента от общего ресурса ГТД;

R – ресурс лопаток компрессора ГТД.

Также следует отметить, что процесс распределения ФОС по структуре лопаток компрессора должен выполняться на базе общего условия последовательного их распределения по структуре лопаток ГТД. Например, процесс последовательного распределения ФОС по структурным элементам на каждом уровне r структуры формируются на базе следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} C_1^r &= f_1(F_1^r = F_{\max}); \\ C_2^r &= f_2(C_1^r, F_2^r); \\ C_3^r &= f_3(C_1^r, F_3^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_i^r &= f_i(C_1^r, F_i^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_n^r &= f_n(C_1^r, F_n^r), \end{aligned} \right\}$$

где $C_1^r, C_2^r, C_3^r, \dots, C_i^r, \dots, C_n^r$ - множество физико-механических свойств соответствующих элементов структуры лопаток компрессора на уровне r ;

$F_1^r, F_2^r, F_3^r, \dots, F_i^r, \dots, F_n^r$ - множество эксплуатационных функций действующих на соответствующие элементы структуры лопаток компрессора на уровне r ;

$C_i^r = f_i(C_1^r, F_i^r)$ - функциональная зависимость физико-механических свойств (производственно-технические свойства) i -го элемента r -го уровня структуры лопаток компрессора от свойств и эксплуатационных функций, действующих на первый элемент структуры лопаток компрессора.

Таким образом, интегрированный технологический инжиниринг в обеспечении ФОС структуры лопаток компрессора базируется на функционально-ориентированном подходе; на комплексе связей, а именно поэтапных, структурных, структурно-эксплуатационных, структурно-свойственных, структурно-технологических, итерационно-рекуррентных; на базе общего принципа или критерия обеспечения эксплуатационных свойств структуры лопаток (например, равного, кратного или функционально-зависимого ресурса элементов структуры); на основе разработанного общего условия последовательного распределения ФОС по структуре элементов. Это позволяет комплексно решать вопросы обеспечения всей структуре элементов ФОС на базе интегрированного многосвязного технологического процесса.

5. Особенности синтеза интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуры лопаток компрессора

Можно отметить, что создание структуры интегрированного многосвязного технологического процесса базируется на общих методологических основах в обеспечении ФОС структуры элементов ГТД, которые основываются на следующих стадиях проектирования [11]:

I-я стадия: Создание общего подхода в обеспечении ФОС структуры элементов ГТД.

II-я стадия: Синтез интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС структуре элементов ГТД.

III-я стадия: Формирование ФОС иерархической структуры элементов ГТД,

IV-я стадия: Синтез интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуры элементов ГТД.

V-я стадия: Разработка технологического обеспечения формирования ФОС структуры ГТД.

VI-я стадия: Обеспечение заданных технико-экономических параметров ГТД.

На IV-ой стадии проектирования выполняется синтез интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуры элементов ГТД [8, 9, 10]. В этом случае, проектируется множество технологических процессов обеспечения ФОС для каждой лопатки компрессора, на базе комплексных связей выполняется композиция этих процессов в единый интегрированный многосвязный технологический процесс обеспечения ФОС структуры лопаток компрессора ГТД. При этом с помощью установленных итерационно-рекуррентных связей выполняется корректирование параметров отдельных технологических процессов в единой структуре интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуры элементов в зависимости от этапов жизненного цикла ГТД, установленных комплексных связей производственно-технических и эксплуатационных свойств структуры лопаток, общего принципа или критерия обеспечения эксплуатационных свойств структуры лопаток, общего условия последовательного распределения ФОС по структуре лопаток, и положений функционально-ориентированного подхода обеспечения ФОС структуры лопаток ГТД.

6. Заключение

В представленной работе выполнен синтез многослойных ФОП структуры лопаток компрессора ГТД на основе интегрированного технологического инжиниринга ФОС посредством определения параметров каждого слоя покрытия на этапах эксплуатации, формирования функционально-ориентированных свойств и разработки технологического обеспечения. На основании анализа особенностей эксплуатации лопаток компрессора ГТД установлено, что износ структурных элементов происходит неравномерно со структурой износа R -родов. Для решения вопросов обеспечения ФОС структуры лопаток ГТД на всех уровнях разработан специальный подход, базирующийся на интегрированном технологическом инжиниринге в обеспечении ФОС структуры лопаток компрессора ГТД на базе ФОП. Выполненный анализ общих особенностей интегрированного технологического инжиниринга в обеспечении ФОС структуры лопаток компрессора ГТД позволил установить основные положения обеспечения заданных свойств всей структуры. Представленный синтез интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуре лопаток компрессора позволяет решать вопросы формирования ФОС по структуре лопаток компрессора ГТД.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богуслаев, В. А. Технология производства авиационных двигателей: ч. II. Основы проектирования технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей и технологическая подготовка производства. / В. А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 557 с.
2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
4. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вып. 4 (50). - С. 126 - 131.

5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения : монография / А. Н. Михайлов. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 346 с.
6. Михайлов, А. Н. Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГТУ, 2021. - С. 76 – 83.
7. Патент № 2718877. Российская Федерация. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов [и др.]. Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.
8. Михайлов, Д. А. Некоторые особенности формирования функционально-ориентированных свойств структуры газотурбинного двигателя и связей параметров технологических процессов / Д. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. А. Колодяжный, Е. А. Шейко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 3 (74). - С. 50 - 64.
9. Михайлов, А. Н. Повышение эксплуатационных свойств лопаток газотурбинного двигателя на базе функционально-ориентированных покрытий / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. А. Колодяжный. // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2021. – Т. 17. - № 10. – С. 435-441. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-10-435-441.
10. Михайлов Д. А. Общие особенности технологического инжиниринга газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами структуры / Д. А. Михайлов [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2021. - № 10 (124). – С. 28-38. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-10-28-38>.
11. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 1 (72). - С. 40 - 57.
12. Михайлов, Д. А. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя на базе комплексной многосвязной технологии / Д. А. Михайлов и [др.] // Передовые технологические разработки: перспективы внедрения в производство и эффективность передовые технологические разработки: перспективы внедрения в производство и эффективность: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Армавир: КГТУ, АМТИ, 2021. – С. 13-18.
13. Патент України на винахід № 94961. Кл. В23Р 15/00. Лопатка газотурбінного двигуна. // Михайлов О. М., Недашковський О. П., Михайлова О. О., Михайлов Д. О. Дата подання заявки 23.03.2010; Бюл. №12 від 25.06.2011. – 5 с.

Поступила в редколлегию 18.02.2022 г.