

УДК 621.01(06)

¹ Т. В. Хавлин, соискатель, ² Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доцент,
³ А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.

¹ ГОО ВПО «Донецкая академия внутренних дел МВД ДНР»,

² ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты», ДНР,

³ ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР,

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

МЕТОД РАЗРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРА ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В данной статье выполняется изучение подхода к выбору условий определяющих последовательность действий технолога при разработке технологического решения для создания технологического процесса связанного с повышением ресурса лопаток турбин, изучается материально-техническое обеспечение процесса обработки поверхностей и технические характеристики абразивного инструмента

Ключевые слова: лопатка турбины, технологические решения, функционально-ориентированные технологии, обработка поверхности.

T. V. Khavlin, D. A. Mikhailov, A. N. Mikhailov

A METHOD OF DEVELOPING A FUNCTIONALLY-ORIENTED TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR SURFACE TREATMENT OF THE PEN TURBINE BLADES OF GAS TURBINE ENGINES

This article deals with the study of the approach to the choice of conditions determining the sequence of actions of the technologist in the development of technological solutions for the creation of technological process associated with the increase in the resource of turbine blades, studied the material and technical support of the surface treatment process and technical characteristics of abrasive tool.

Keywords: turbine blade, technological solutions, functional-oriented technologies, surface treatment.

1. Введение

В современном машиностроении особое место занимают функционально-ориентированные технологии (ФОТ) необходимость применения которых опирается на интеллектуальные и материальные итоги комплексного анализа существующих потребностей (проблем). Продуктом этой аналитики становится реакция, в виде трансформации технологического процесса, призванного сформировать новые свойства и меру полезности изделий [1], по средствам создания универсального технологического процесса (процесса) повышения их ресурса.

В нашей работе планируется применить ФОТ для создания такого процесса, главной целью которого будет повышение ресурса деталей турбин газотурбинных двигателей (ГТД). Например, авиационных (ТВ2-117, ТВ3-117, ВК-2500 и т.д.), судовых, установок топливно-энергетического комплекса (ГТЭС-2,5 и т.д.), а также боевых машин (ГТД-1000Т, перспективный ГТД для БМП «Рыцарь») и т.д.

Эффективность применения именно ФОТ, для решения вопросов, связанных с повышением ресурса деталей ГТД, например, таких как лопатки турбины оправдывается самим подходом. А именно возможностью осуществления глубокого (прецизионного) анализа процесса разрушения пера лопатки с последующей разработкой общих принципов и подходов в создании технологии изготовления и

восстановления лопатки турбины на основе применения защитных покрытий [2, 3, 4, 5, 6].

Ориентируясь на изложенное выше, можно определиться с целью данной работы – это проектирование процесса для повышения ресурса лопаток турбины ГТД и разработка технологических решений (решений) по обработке поверхностей пера.

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

1. Определение определяющих условий (условий) построения процесса.
2. Изучение функционально-ориентированного материального обеспечения (ФОМО), как части алгоритма организации процесса.
3. Подбор предложений для повышения эффективности проектирования процесса.

Учитывая, что цель данной работы – проектирование универсального технологического процесса для повышения ресурса лопаток турбин ГТД, мы проведем ряд целевых исследований, направленных на решение следующих задач:

1. Определения условий построения процесса, и рассмотрение методики прецизионного изучения их множеств и подмножеств, организационных связей между ними.
2. Изучения ФОМО, рассмотрение процедуры создания базы обеспечения на основе существующих (перспективных) или правильно сказать функционально-ориентирующих запросов (проблем, условий, функций, подфункций и т.д.) с учётом возможностей производственных сфер.
3. Подбора предложений для повышения эффективности проектирования процесса для чего осуществим выбор и изучение абразивных способностей (АС) материалов применимых для обработки поверхностей.

2. Основное содержание и результаты работы по определению условий влияющих на выбор технологических решений

В процессе обработки поверхности пера лопатки турбины, следует обратить внимание на некоторые условия построения процесса, которые, в сущности, будут определять структуру и набор технологических операций. Перечень возможных условий отображен на рис. 1.

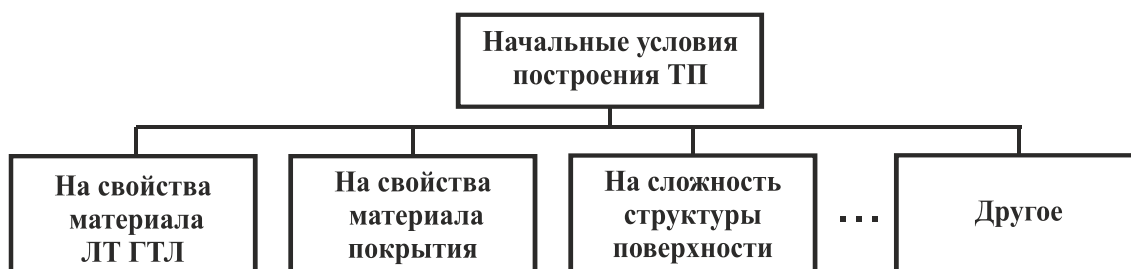


Рисунок 1. Начальные условия для процесса подбора технологических решений.

Среди них:

- условия обработки поверхностей пера лопатки (C_m), ориентирующие технолога на свойства жаропрочных материалов (никелевых, кобальтовых, титановых, легированных, металлокерамических и др.) без покрытия [7, 8, 9].

- условия обработки поверхности (C_l), ориентирующие технолога на свойства защитных покрытий пера лопатки (способ нанесения, толщина слоя, применяемый материал, геометрия слоя и др.) [7, 8, 9].

- условия (C_d), ориентирующие на особенности одновременной обработки сложной структуры поверхности или материалов с различными свойствами систем (металл – покрытие, покрытие традиционное – покрытие функционально-ориентированное) и др. [7, 8, 9].

Множество данных условий может быть представлено следующим выражением [1]:

$$E = \{C_m, C_l, C_d, \dots, C_n\}, \tag{1}$$

где E – общий объём множества условий для разрабатываемого процесса; C_m – множество условий, ориентирующих технолога по средствам свойств основного материала; C_l – множество условий, ориентирующих технолога по средствам свойств защитных покрытий; C_d – множество условий, ориентирующих технолога по средствам сложной структуры поверхности или материалов с различными свойствами систем; C_n – мощность многовариантного кортежа условий управляющих выбором решения.

Также данные условия можно отобразить множеством кортежей элементарного типа $(C_{m_j}, C_{l_j}, C_{d_j}, \dots, C_{n_j})$ характерных, например для какого-либо j – ого иерархического уровня деления свойств поверхности (пространства) для которой подбираются варианты решений.

Такое множество элементарных кортежей условий свойств поверхности (пространства) j – ого иерархического уровня деления можно записать следующим образом [1]:

$$E = \{(C_{m1j}, C_{l1j}, C_{d1j}, \dots, C_{n1j}), (C_{m2j}, C_{l2j}, C_{d2j}, \dots, C_{n2j}), \dots, (C_{mnj}, C_{lnj}, C_{dnj}, \dots, C_{nnj})\}, \tag{2}$$

В свою очередь, особенность ФОТ требует учитывать необходимость ориентирования при выборе технологических решений на уровне глубины технологии, и на примере множества условий, ориентирующих технолога по средствам свойств основного материала (C_m) можно представить элементарным кортежем j – ого иерархического уровня данных условий, следующим образом [1]:

$$\left. \begin{aligned} C_{m1j} &= \{C_{11}, C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1v_1}\}; \\ C_{m2j} &= \{C_{21}, C_{22}, C_{23}, \dots, C_{2v_2}\}; \\ C_{m3j} &= \{C_{31}, C_{32}, C_{33}, \dots, C_{3v_3}\}; \\ &\dots \\ C_{mnj} &= \{C_{n1}, C_{n2}, C_{n3}, \dots, C_{nv_n}\} \end{aligned} \right\}, \tag{3}$$

где $C_{m1j}, C_{m2j}, C_{m3j}, \dots, C_{mnj}$ – порядки множеств элементарных условий возникающих на j – ом уровне свойств основного материала;

C_{ji-i} – e элементарное подмножество начальных условий j – го уровня глубины изучения свойств основного материала;

$v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ – мощность множеств каждого из $C_{m1_j}, C_{m2_j}, C_{m3_j}, \dots, C_{mn_j}$ порядка множеств.

Подобно C_m происходит реализация, изучение, преобразование, деление, объединение C_l и C_d .

Процесс прецизионного изучения множеств и подмножеств начальных условий, организационных связей между ними (прямых и обратных), а также их деление, объединение и классификация происходит до требуемого уровня глубины технологии [1].

В соответствии с организационными, техническими, технологическими, потребительскими и т.д. запросами (условиями, требованиями) в той или иной сфере использования ГТД, такой процесс стремиться создать инвариант решения наиболее отображающего существующую перспективу для выбранного (любого) изделия. В этом и заключается универсальность создаваемого технологического процесса.

Модель подбора решений на любом уровне можно представить в следующем виде (рис. 2), где пунктиром выделена гипотетически существующая область вариантов множеств начальных условий. Модель, опирающаяся на принцип вычисление полусуммы теоретически возможных показателей (величин) воздействий, ресурсов (модулей, коэффициентов и т.д.) следующих множеств (условий): C_m – множество условий ориентирующих технолога по средствам свойств основного материала; C_l – множество условий ориентирующих технолога по средствам свойств защитных покрытий; C_d – множество условий ориентирующих технолога по средствам сложной структуры поверхности или материалов с различными свойствами систем; C_n – мощность многовариантного кортежа условий управляющих выбором решения; SC – внешнее условие связанное с наличием химической коррозии; ME – условие механической эрозии; HTO – условие высокотемпературного окисления.

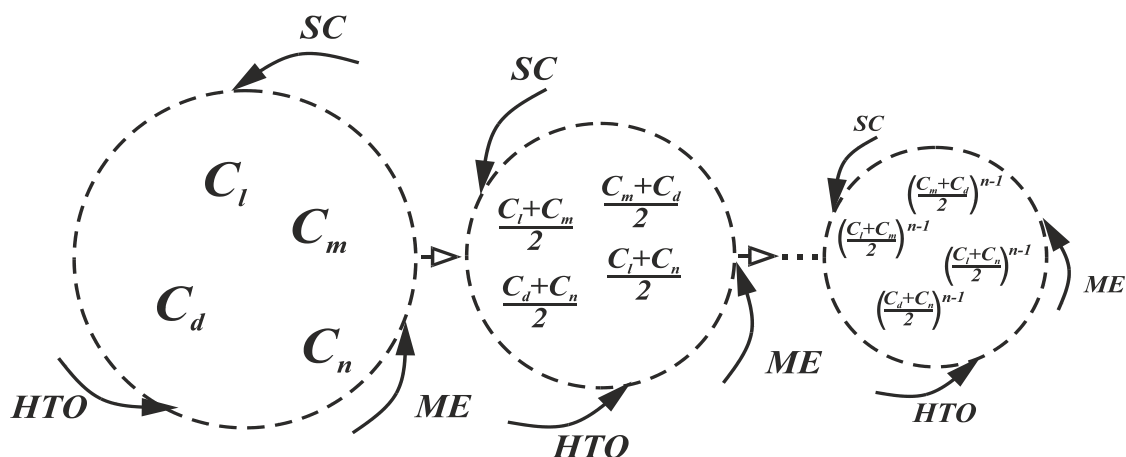


Рисунок 2. Модель итерации процесса изучения множеств условий.

Такой процесс оперирования начальными условиями должен происходить до предела функций, т.е. стремиться к максимальной точности изучения и выбора.

Поле композиций технологических решений на уровне микро, макро и даже нано структур образующееся в результате изучения начальных условий, а именно выполнения математических операций можно представить в виде следующего выражения [1]:

$$S_{t(i+1)} = C_m \cap C_l \cap C_d \cap C_n, \quad (4)$$

где $S_{t(i+1)}$ – технологическое решение $(i+1)$ – го уровня глубины технологии формируемое пересечением множеств начальных условий для любого единичного участка поверхности обрабатываемой детали.

Учитывая, тот факт, что в результате технического прогресса происходят изменения в эксплуатационных условиях, технологиях и т.д. существует прямая вероятность возникновения новшеств, в производстве и условиях эксплуатации и поэтому условия ориентиры так же изменяют вид, мощность, размерность, степень, т.е. станут новыми или будут являться прогнозируемыми. Этот вывод можно отобразить в виде следующего выражения [1]:

$$E_p = \bigcap_{j=1}^{c_v} C_{nj}, \quad (5)$$

где E_p – перспективно новый объем условий; C_{nj} – j -е множество условий n – го уровня исследования свойств обрабатываемой среды (поверхности); c_v – мощность подмножества перспективно новых начальных условий.

3. Изучение ФОМО, как части процесса организации УТП

Следующим шагом формирования технологического процесса станет вопрос организации его обеспечения требующее обратить внимание на следующее:

- функционально-ориентированный подбор материалов для обработки поверхности лопатки с учётом возможного изменения свойств основного материала (метал, металл/покрытие, керамика, керамика/покрытие и др.);
- функционально-ориентированный подбор материалов для обработки поверхности лопатки с учётом возможного изменения свойств нанесенного покрытия (покрытие однослойное, покрытие многослойное, покрытие многомодульное и др.);
- функционально-ориентированный подбор инструмента для обработки поверхности лопатки с учётом возможного изменения геометрии поверхности (входная кромка, выходная кромка, корыто, спинка, переходные поверхности, элементы системы охлаждения и др.);
- функционально-ориентированный выбор режимов обработки (скорость, усилие, способ отвода тепла, наличие ингибиторов и т.д.) и продолжительности технологических воздействий на обрабатываемую поверхность (единовременное, непрерывное, прерывистое, комплексные варианты);
- другое.

Всё это в свою очередь указывает на необходимость создания ФОМО для выбора решений на основе методики рассмотренной выше.

Главным направлением (факторами, аспектами, функциями и т.д.) в работе по изучению и в дальнейшем применению ФОМО (видов, способов, методов, процессов, материалов, особенностей и т.д.) должно быть его правильно выполненный функционально-ориентированный подбор и внедрение в процесс создания технологического процесса. Так, например, при создании системы обеспечения следует учитывать то, что материалы, с которыми придется столкнуться при обработке той же поверхности пера лопатки ГТД, имеют свойства, позволяющие работать им в условиях, обобщающих в себе высокие нагрузки, давление, скорости вращения, температуру и её перепады, а также химически активную среду. В связи с чем, сложность обрабатываемости материала пера лопатки, будет начальным условием, указывающим на необходимость использования тех или иных средств обработки.

С этой целью мы в своей работе выполнили формирование основы для последовательности и системности в подборе материальных, энергетических, и информационных ресурсов (потоков) процесса, отобразив это в базовой функционально-ориентированной схеме-классификации материального обеспечения с учётом различных аспектов (рис.3). Здесь: ТП – технологический процесс; УТП – универсальный технологический процесс; I – общий информационный поток определяющий набор технологических решений; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – информационные потоки обратной связи по результатам контроля качества.

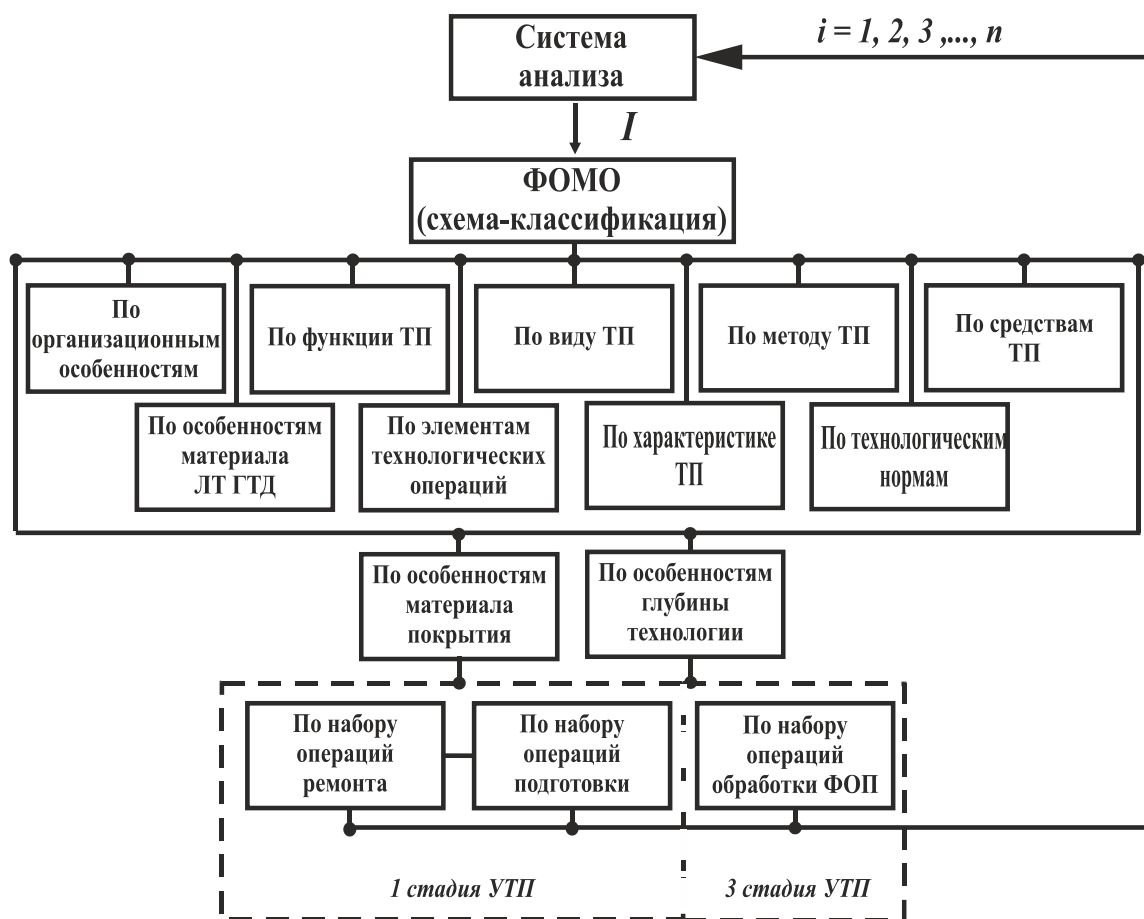


Рисунок 3. Схема-классификация ФОМО УТП.

На данной схеме выполнена классификация функционально-ориентированного материального обеспечения по следующим аспектам:

- по организационным особенностям процесса повышения ресурса лопаток турбин (маршрутная карта, операционная карта, технологическая карта, производственная программа и т.д.);
- по функции процесса повышения ресурса лопаток турбин (изготовление, ремонт, модернизация и т.д.);
- по виду (критерию, степени) процесса повышения ресурса лопаток турбин (степень унификации, назначение, детализация и т.д.);
- по методу процесса повышения ресурса лопаток турбин (обработка, контроль, маркирование, упаковывание и т.д.);
- по форме обрабатываемой поверхности лопаток турбин (точка, линия, поверхность, объёмы и т.д.);
- по элементам процесса повышения ресурса лопаток турбин (установ, переход, базирование и т.д.);
- по характеристике процесса повышения ресурса лопаток турбин (такт, ритм, режим, припуск и т.д.);
- по нормам процесса повышения ресурса лопаток турбин (энергетические ресурсы, материальные ресурсы, информационные ресурсы и т.д.)
- по средствам повышения ресурса лопаток турбин для 3-х стадий процесса (средства, оборудование, оснастка, инструмент, приспособления, функционально-ориентированные изобретения/внедрения и т.д.);
- по особенностям материала пера лопатки (тип и свойства материала заготовки, тип и свойства материала детали и т.д.);
- по набору функционально-ориентированных операций ремонта лопатки турбины (снятие нагара и отложений, заполировка раковин/сколов/прогаров, снятие/обработка полное/частичное покрытия, обработка покрытия традиционного/специального и т.д.);
- по набору функционально-ориентированных операций подготовки поверхности новых лопаток турбин (подготовка новой поверхности с учетом материала подложки традиционная, подготовка новой поверхности с учетом материала подложки функционально-ориентированная и т.д.);
- по набору функционально-ориентированных операций обработки специальных покрытий (подготовка новой поверхности с учетом материала покрытия, геометрии покрытия и т.д.);
- по особенностям материала покрытия (тип и свойства материала имеющегося покрытия, наличие функционально-ориентированных особенностей покрытия и т.д.);
- по набору функционально-ориентированных операций на разных уровнях глубины технологии (на уровне функциональных элементов, частей, зон, микрозон, макрозон, нанозон).

3. Подбор предложений для повышения эффективности проектирования процесса

Конкретизируя изложенное выше, мы предлагаем в первую очередь для проектирования рассматриваемого процесса выполнять следующее:

- подбор и изучение абразивных способностей материалов применимых для обработки пера ЛТ ГТД;
- изучение спектра применяемых инструментов для обработки ЛТ ГТД;

- изучение возможности создания и внедрения способа и устройства для обработки пера лопатки турбины (полировальник ориентированной абразивной способности);
- изучение особенностей обработки жаропрочных сплавов на никелевой (кобальтовой) основе (метал, металл и покрытие, покрытие) и др.

Результатом реализации указанной последовательности, на начальном этапе исследования, станет совершенствование структуры процесса обработки лопатки турбины ГТД с применением выбранных решений. Что необходимо для обеспечения разноуровневой равноэффективной готовности (ОРРГ) поверхности к нанесению защитного покрытия (1 стадия УТП) и в дальнейшем разноуровневой равноэффективной защиты (ОРРЗ) [4] поверхности (3 стадия УТП) к эксплуатации в сложных условиях.

Так же, для более качественного подбора решений следует обратить внимание на тот факт, что качество поверхностного слоя (реальной поверхности) во многом определяет износостойкость детали. Само же качество поверхности – это, безусловно, совокупность физических, химических, а лучше сказать комплексных свойств обработанной поверхности, в нашем случае пера лопатки турбины ГТД.

Условно комплекс приобретаемых свойств после обработки (подготовки) можно разделить на [10, 11]:

- геометрические свойства или характеристики поверхности;
- физико-механические свойства или характеристики поверхности.

Из общего перечня можно выделить некоторые свойства (характеристики), которые в первую очередь должны быть приданы поверхностям (частям, элементам, зонам и т.д.) лопатки турбины ориентируясь на неравномерно действующие эксплуатационные нагрузки с целью функционального ориентирования, процесса обработки пера лопатки [3, 4]. Конкретнее, технолога на этапе выбора решений должен интересовать вопрос возможности обеспечения качественных свойств на уровне микро и макрогеометрии.

Лопатки турбин газотурбинных двигателей в современном производстве изготавливаются по различным технологиям, о чём говорит выполненная в [12] классификация. В качестве материала в основном используется (использовались) сплавы на никелевой основе (ВЖМ1-ВЖМ8, ВЖЛ20, ЖС30М, ЖС32, ЖС36, ЖС40, ЖС47 и т.д.) при этом в большинстве случаев поверхности пера лопаток подвергаются процедуре повышения ресурса за счёт нанесения защитных покрытий мощным энергетическим воздействием, например, применяется ионно-плазменное напыление [3, 5], но несмотря на это, при эксплуатации лопаток турбин происходит их специфическое разрушение, изученное в [4].

С учетом свойств основного материала, свойств материала покрытия, специфику разрушения пера лопатки, обработка (полировка) поверхности пера лопатки турбины будет иметь несколько вариантов исполнения:

- подвергающиеся обработке поверхности пера лопатки (функциональные элементы) изготовлены из никелевого (другого) жаропрочного (термостойкого) сплава, поэтому обработка будет производиться исключительно никелевого (другого) сплава опираясь на начальные условия возникающие, например, на фоне свойств сплава;
- подвергающиеся обработке поверхности пера лопатки (функциональные элементы) изготовлены из никелевого жаропрочного (термостойкого) сплава имеют

защитные покрытия (электронно-лучевое испарение, ионно-плазменное напыление, детонационное напыление, и др.), поэтому обработка будет производиться исключительно самого покрытия [13] с учётом начальных условий возникающих, например, на фоне свойств покрытия;

- полное снятие (выполировка) выполняется только покрытий, либо 1-й, 2-й, 3-й, ..., n – й слоёв модульного покрытия;

- подвергающиеся обработке поверхности пера лопатки (функциональные элементы) изготовлены из никелевого (другого) жаропрочного (термостойкого) сплава имеют защитные покрытия и обработка, при наличии неоднородностей разрушения, будет производиться одновременно и покрытия, и основного металла, с учётом начальных условий возникающих, например, на фоне свойств покрытия и металла (комбинированная обработка).

Следующим шагом в подборе предложений по повышению эффективности процесса обработки лопаток будет изучение материалов и инструмента для обработки. Так, например, при выборе паст и суспензий (смазочно-охлаждающих жидкостей) необходимо изучать условия, которые будут сопровождать весь процесс (наличие различных химически-активных вставок и жидкостей, степень вязкости основы и т.д.). При их приготовления процентное соотношение микропорошка (тонкого микропорошка) и основы (1:5, 1:3, 1:1 и т.д.), должно определяться начальными условиями, работающими перспективу в придании требуемых свойств поверхности металла (C_m) и свойств покрытию (C_l).

При изучении вопроса выбора инструмента для полирования, предлагается выполнять такую технологическую операцию с помощью полировального круга, инструмента, выполненного из определенного материала способного с одной стороны обладать достаточной прочностью, а с другой обладать эластичностью, легкостью и способностью удерживать абразивную композицию. Материалом для изготовления полировальных кругов может служить войлок, фетр, резина, полимерные композиции, ткани и др.

В перспективе, возможно, следует изучить вопрос применения ориентированных полировальников для предотвращения неравномерного полирования поверхностей из двух материалов имеющих различную микротвердость в связи с возможным возникновением продавливания менее твердого материала.

Обработка поверхностей лопатки турбины должно выполняться в течение нескольких последовательных технологических операций. Так для получения шероховатости $R_z = 0,025 \dots 0,032$ мкм, при исходном параметре шероховатости $R_a = 0,25 \dots 0,32$ мкм необходимо выполнить четыре и более технологических операций, по полировке поверхности, а в случае удаления защитного покрытия с поверхности пера лопатки в следующем порядке:

1. Снятие покрытия (припуск – 0,050 ... 0,070 мм), $R_a = 0,08 \dots 0,125$ мкм.
2. Предварительное полирование (припуск – 0,010 ... 0,015 мм), $R_a = 0,04 \dots 0,063$ мкм.
3. Окончательное полирование (припуск – 0,005 ... 0,007мм), $R_a = 0,02 \dots 0,025$ мкм.
4. Глянцевание (припуск – 0,0005 ... 0,001 мм), $R_z = 0,025 \dots 0,032$ мкм.

Для снижения погрешности на обработку реальной поверхности пера лопатки выбор припусков на обработку можно просчитать с применением формулы по расчёту коэффициентов уточнения,

$$\left. \begin{aligned} K_e^R &= k_1^R k_2^R \cdots k_n^R = \prod_{i=1}^n k_i^R, \\ K_e^h &= k_1^h k_2^h \cdots k_n^h = \prod_{i=1}^n k_i^h, \\ K_e^\Delta &= k_1^\Delta k_2^\Delta \cdots k_n^\Delta = \prod_{i=1}^n k_i^\Delta, \\ K_e^T &= k_1^T k_2^T \cdots k_n^T = \prod_{i=1}^n k_i^T; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $K_e^R, K_e^h, K_e^\Delta, K_e^T$ - единые коэффициенты уточнения параметров реальной поверхности обрабатываемой детали, соответственно высоты неровностей профиля, глубины слоя дефекта, суммарного отклонения расположения поверхности и допуска по размеру;

$K_i^R, K_i^h, K_i^\Delta, K_i^T$ - коэффициенты уточнения i -х параметров реальной поверхности, а именно всех соответствующих параметров.

Здесь:

$$\left. \begin{aligned} K_e^R &= \frac{R_{z0}}{R_{zn}}, & k_i^R &= \frac{R_{z(i-1)}}{R_{zi}}; \\ K_e^h &= \frac{h_0}{h_n}, & k_i^h &= \frac{h_{(i-1)}}{h_i}; \\ K_e^\Delta &= \frac{\Delta_{\Sigma 0}}{\Delta_{\Sigma n}}, & k_i^\Delta &= \frac{\Delta_{\Sigma(i-1)}}{\Delta_{\Sigma i}}; \\ K_e^T &= \frac{T_{A0}}{R_{An}}, & k_i^T &= \frac{T_{A(i-1)}}{R_{Ai}}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где T_{A0}, T_{An}, T_{Ai} - допустимые параметры размера заготовки, детали (реальной поверхности с i -м технологическим процессом или его частью (операция, переход), соответственно [14];

$R_{z(i-1)}$ - высота микрогеометрии поверхности на предшествующей части технологической операции;

$h_{(i-1)}$ - глубина микрогеометрии поверхности (слоя) на предшествующей части технологической операции;

$\Delta_{\Sigma(i-1)}$ - результирующие отклонения и различия расположения и форм поверхностного слоя предшествующей части технологической операции.

Коэффициенты уточнения величины ориентируемые, их цифровые отображения могут иметь различное значение, т.к. ориентируются в основном на способы механического воздействия при обработке.

В ходе нашей работы принято решение считать, что наиболее оптимальными значения коэффициентов уточнения для процессов полировки различных поверхностей лопатки турбины будут следующие значения:

- механическая обработка поверхности с нанесённым защитным покрытием – $k_i \geq 2,5 \dots 4,0$;
- предварительная заполировка поверхности (покрытия) – $k_i = 2,0 \dots 2,5$;
- окончательная заполировка поверхности (покрытия) – $k_i = 1,5 \dots 1,8$;
- зеркальная заполировка поверхности – $k_i = 1,2 \dots 1,5$.

В качестве технических параметров воздействия полировального инструмента на обрабатываемую поверхность мы рекомендуем использовать следующие показатели:

- частота вращения полировальника – ≤ 2800 об/мин;
- усилие прижима для предварительного полирования – $5 \dots 15$ кг/см²;
- усилие прижима для глянцеваания – $2 \dots 5$ кг/см².

Кроме этого, при полировании, операции обработки необходимо осуществлять с постепенным уменьшением зернистости абразивного материала. Такой подход в целом будет способствовать повышению ресурса лопаток турбин на различных уровнях, а именно:

- на уровне обеспечения хорошей адгезии материалов на границе сплав–покрытие (ориентируясь на возможность использования различных материалов, как при изготовлении лопатки, так и покрытия);
- на уровне повышения качества поверхности с нанесённым защитным покрытием (замедлит процесс нивелирования поверхности под механическим воздействием, предотвратит налипание пыли, частиц песка и т.д.).

4. Выводы

В ходе проведённой работы было выполнено следующее:

1. Определено наличие неких факторов, которые нами обозначены как начальные условия построения процесса, предложена методика прецизионного изучения множеств и подмножеств начальных условий, организационных связей между ними (прямых и обратных), а также их деление, объединение и классификация.
2. Проведено изучение ФОМО, как части организации универсального технологического процесса.
3. Выполнена начальная часть исследования абразивных способностей с целью подбора материалов и режимов, применимых для обработки поверхностей пера лопатки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 347 с.
2. Хавлин, Т. В. Актуальность функционально-ориентированного подхода в повышении свойств изделий / Т. В. Хавлин // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Т. 2. – С. 149-150.
3. 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. – Вып.1 (56). – С. 84-100.

4. Хавлин, Т. В. Исследование особенностей разрушения лопаток турбин авиационных двигателей / 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 (Электронный ресурс): 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 2018г. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – С. 182-185.

5. Михайлов, В. А. Повышение структурной надежности вертолетных газотурбинных двигателей / В. А. Михайлов, А. П. Пичко, Т. В. Хавлин, А. А. Колодяжный, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Гитуни, А. Н. Михайлов // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т. 2 . – С. 62-66.

6. Пичко, А. П. К определению структурной надежности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А. П. Пичко, В. А. Михайлов, А. А. Колодяжный, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 2 (61). – С. 64-74.

7. Абраимов, Н. В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин / Н. В. Абраимов. – М.: Машиностроение, 1993.– 336 с.

8. Шальнов, В. А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов / В. А. Шальнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

9. Абраимов, Н. В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учебное пособие для авиационных вузов / Н. В. Абраимов, Ю. С. Елисеев, В.В. Крымов – М.:Высш. школа, 1998. – 444 с.

10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение. – Т. 1, 1986. – 656 с.; Т. 2, 1985. – 496 с.

11. Кремень, З.И. Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.

12. Хавлин, Т.В. Создание функционально-ориентированной технологии повышения ресурса лопаток турбин авиационных двигателей / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, С. В. Глухов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы Международной научно-технической конференции 17–19 октября 2018 г.: в 2 ч. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. – Ч. 2. – 152 с.

13. Качанов, Е. Б. Покрытия для защиты лопаток турбин от сульфидной коррозии. Защита от коррозии. Покрытия / Е. Б. Качанов, Ю. А. Тамарин // Технология легких сплавов: Научно-технический журнал . – Москва: ВИЛС, 2005. – № 1-4. – С. 171-180.

14. Журавлев, А. Н. Допуски и технические измерения / А. Н. Журавлев. – М.: Высш. школа, 1981. – 256 с.

Поступила в редколлегию 26.01.2019 г.