

**ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА
ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Михайлов А.Н. Михайлов Д.А. (Кафедра ТМ ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

In given work are brought some stages syntheses technological processes of the fabrication of the blades gas turbine engine on base of the function-oriented approach. The Presented structure working function of the blades gas turbine engine and is designed earl functional element on level of the fission. The Broughted categorization person characteristic feather of the blades gas turbine engine at realization function-oriented technology

Лопатки авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) обычно работают в сложных эксплуатационных условиях. При этом они испытывают множество эксплуатационных нагрузок, возникающих из-за пароводяных, аэродинамических, кислотно-щелочных, термических воздействий, действия изгибающих и контактных напряжений, возникающего сложно деформированного состояния и износа поверхностных слоев, микровоздействий частиц пыли, песка, вулканического пепла и других элементов. Эти воздействия отрицательно влияют на эксплуатационные свойства лопаток ГТД. Причем в ряде случаев, они даже приводят к разрушениям лопаток и возникновению из-за этих явлений катастроф. Поэтому разработка мероприятий повышения их надежности на основе обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств функциональных элементов лопаток ГТД является актуальной проблемой. Решение этих вопросов обычно выполняется на этапе конструкторской и технологической подготовки производства лопаток ГТД. Особенно важным этапом подготовки производства лопаток ГТД является разработка и реализация технологического процесса их изготовления. Именно на этом этапе формируются необходимые свойства лопаток ГТД для выполнения необходимых эксплуатационных функций.

Можно отметить, что применяемые в настоящее время технологии и приемы изготовления лопаток ГТД [1, 2, 3] обеспечивают необходимые их эксплуатационные свойства для определенных условий работы. Вместе с тем, непрерывный технический прогресс требует дальнейшего повышения эксплуатационных свойств авиационной техники, обеспечения качественно новой совокупности свойств двигателей и их элементной базы, в том числе создания двигателей 5-го, 6-го, ..., n -го поколения. Решение этих вопросов возможно на основе применения для изготовления элементной базы авиационных двигателей, а именно для производства лопаток ГТД, функционально-ориентированных технологий [4, 5].

Функционально-ориентированные технологии относятся к новому классу технологий, обеспечивающих возможность реализации качественно новой совокупности свойств изделий [4, 5], в том числе и лопаток ГТД. При этом здесь процесс создания функционально-ориентированных технологических процессов базируется на новом подходе и выполнении трех основных этапов их синтеза.

Заметим что, для традиционных организационно-технологических форм технологических процессов процесс их синтеза основывается на выполнении двух основных этапов: деление изделия на исполнительные поверхности (выполнение классификации исполнительных поверхностей) и составление структуры технологического процесса. При этом здесь, каждое изделие делится на исполнительные поверхности и только для них составляется технологический процесс. В процессе синтеза функционально-ориентированных технологий каждое изделие делится на функциональные элементы в соответствии с иерархической структурой уровней глубины технологии.

ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Следует заметить, что процесс создания функционально-ориентированных процессов для лопаток ГТД выполняется впервые и имеет свои определенные особенности, которые будут рассмотрены в данной работе. Здесь можно отметить, что в рамках этой работы вся структура функционально-ориентированного процесса изготовления лопаток ГТД не приводится.

Целью данной работы является разработка общих основ синтеза функционально-ориентированных технологических процессов для изготовления лопаток ГТД для обеспечения повышения их эксплуатационных свойств.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие основные задачи: выполнить анализ этапов синтеза технологического процесса обработки лопаток газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода; разработать структуру эксплуатационных функций лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя и граф функциональных элементов по уровням деления; предложить классификацию особых свойств пера лопатки газотурбинного двигателя при реализации функционально-ориентированных технологий.

На рис. 1 показаны основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов. Здесь методика проектирования функционально-



Рис. 1. Основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов

ориентированных технологических процессов не является отдельным монолитным этапом. Она представляет собой один из шагов на пути последовательной итеративной разработки технологического процесса. При этом последовательность и методология базируется на замкнутой рекуррентной структуре. Основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов следующие:

1. Анализ эксплуатационных особенностей изделия и составление

структуры функций.

2. Деление изделия на функциональные элементы по уровням «глубины технологии» и их классификация.

3. Формирование структуры или маршрута технологического процесса на базе особых принципов ориентации.

Здесь каждый из этапов методики синтеза функционально-ориентированных технологических процессов имеет определенные особенности проектирования, представленные на рис. 1. А именно: на 1-м этапе методики выполняется анализ особенностей эксплуатации изделия и составляется структура действующих функций; на 2-м этапе производится деление изделия на функциональные элементы по 7-ми иерархические уровням деления или «глубины технологии»; на 3-м этапе формируется структура

ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

и маршрут технологического процесса, при этом на базе 8 особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств функциональных элементов производится замыкание процесса проектирования (образуется замкнутая форма реализации методики проектирования).

На рис. 2 представлена лопатка направляющего аппарата газотурбинного двигателя. Здесь, на рис. 2,а показан чертеж лопатки, на рис. 2,б – общий вид лопатки.

Лопатка направляющего аппарата (рис. 1,а) газотурбинного двигателя имеет следующие элементы: 1 – перо лопатки, 2 – буртик лопатки, 3 – цапфа лопатки (хвостовик лопатки). В таблице представлены геометрические параметры сечений пера лопатки направляющего аппарата ГТД. Множество элементов $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_7$ (рис. 1)

Таблица. 1. Геометрические параметры сечений пера лопатки направляющего аппарата ГТД

Размеры, мм	Сечение				
	$A_1 - A_1$	$A_2 - A_2$	$A_3 - A_3$	$A_4 - A_4$	$A_5 - A_5$
$И \pm 0,2$	20,1	18,8	17,5	16,1	15,5
$B_1 \dots B_5$	5	15	25	35	40

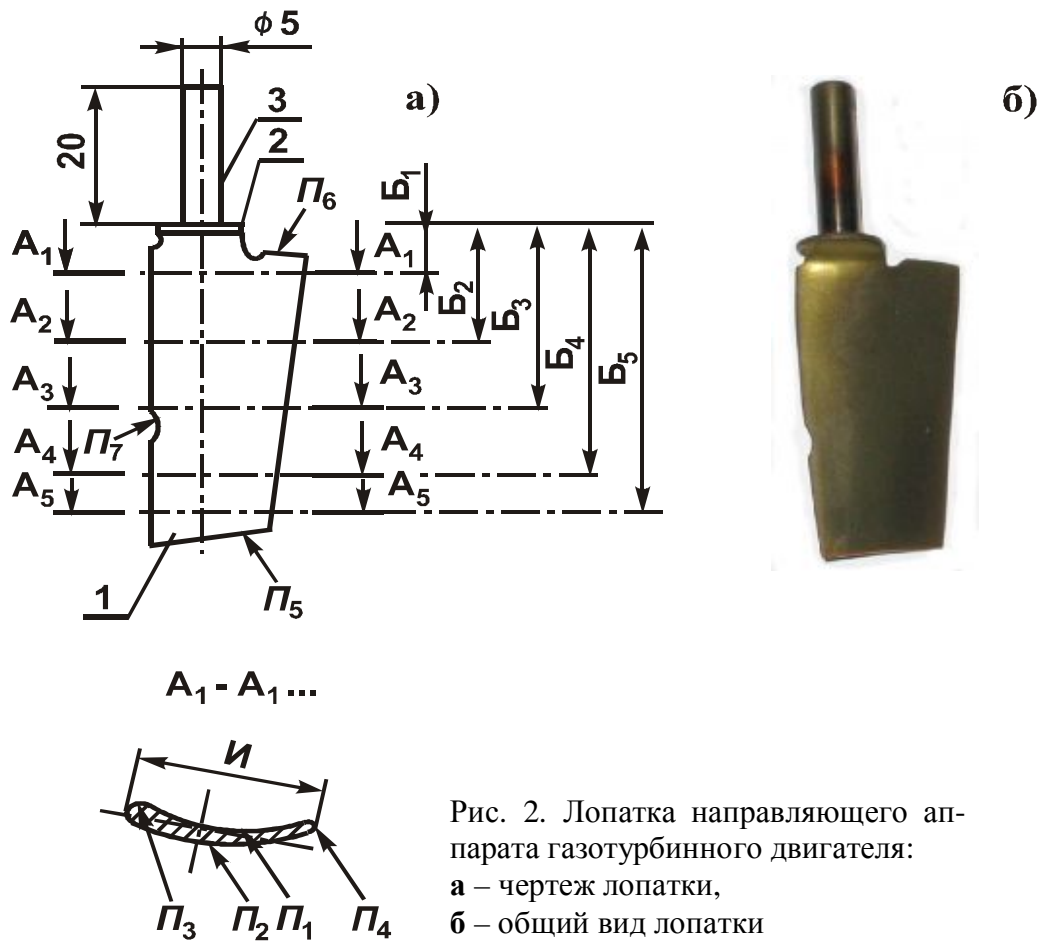


Рис. 2. Лопатка направляющего аппарата газотурбинного двигателя:

а – чертеж лопатки,

б – общий вид лопатки

обозначают поверхности соответствующего номера.

ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

На рис. 3 представлен граф эксплуатационных функций лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя по уровням деления. Здесь, общая эксплуатационная функция лопатки направляющего аппарата делится по 4-м уровням.

Общая эксплуатационная функция лопатки направляющего аппарата на 2-м уровне делится на три составляющие:

- эксплуатационная функция пера лопатки и связей пера с буртиком;
- эксплуатационная функция буртика лопатки и связей буртика с цапфой;
- эксплуатационная функция цапфы лопатки и связей цапфы с диском.

Можно отметить, что каждая из этих трех функций на 2-м уровне подразделяется на две подфункции. При этом эксплуатационная функция пера лопатки и связей пера с буртиком делится следующим образом:

- основная и обеспечивающая функции пера лопатки (f_1);
- основная и обеспечивающая функции переходной части пера лопатки (f_2).

Эксплуатационная функция буртика лопатки и связей буртика с цапфой делится на следующие подфункции:

- основная и обеспечивающая функции буртика пера лопатки (f_3);
- основная и обеспечивающая функции переходной части буртика пера лопатки (f_4).

Следует отметить, что эксплуатационная функция цапфы лопатки и связей цапфы с диском представляет собой основную и обеспечивающую функцию цапфы лопатки, а также функции, действующие от связей цапфы с диском (f_5).

На 3-м уровне каждую из этих подфункций можно разделить на множество подфункций более низкого уровня сложности. Например, подфункция основная и обеспечивающая функции пера лопатки может быть разделена следующим образом:

- обеспечивающие заданные аэродинамические свойства;
- переменные удельные контактные нагрузки, износ и разрушения поверхностного слоя;
- переменные изгибающие напряжения и температурные напряжения.

В качестве следующего примера (рис. 2) можно рассмотреть основную и обеспечивающую функцию переходной части пера лопатки, которую можно подразделить следующим образом:

- переменные изгибающие напряжения и температурные нагрузки;
- концентраторы напряжений и переменные напряжения;
- заданные аэродинамические свойства и свойства снижающие концентрацию напряжений.

Далее, каждая подфункция 3-го уровня может быть разделена на функции, которые реализуются поверхностями, поверхностными слоями и объемами.

На 4-м уровне графа эксплуатационных функций лопатки направляющего аппарата (рис. 3) могут быть рассмотрены элементарные функции, действующие зонально на функциональные элементы.

После выполнения анализа действия эксплуатационных функций, действующих на лопатку направляющего аппарата ГТД, выполняется деление лопатки на функциональные элементы и составляется их структура.

На рис 4 представлен граф функциональных элементов лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя по уровням деления. Здесь, на 3-м уровне деления функциональных элементов введены следующие обозначения: $П_i$ - i -я поверхность, $ПС_j$ - j -й поверхностный слой, $О$ - объемный функциональный элемент. На 4-м уровне деления функциональных элементов, представлены зональные элементы, которые обозначены $З_k$.

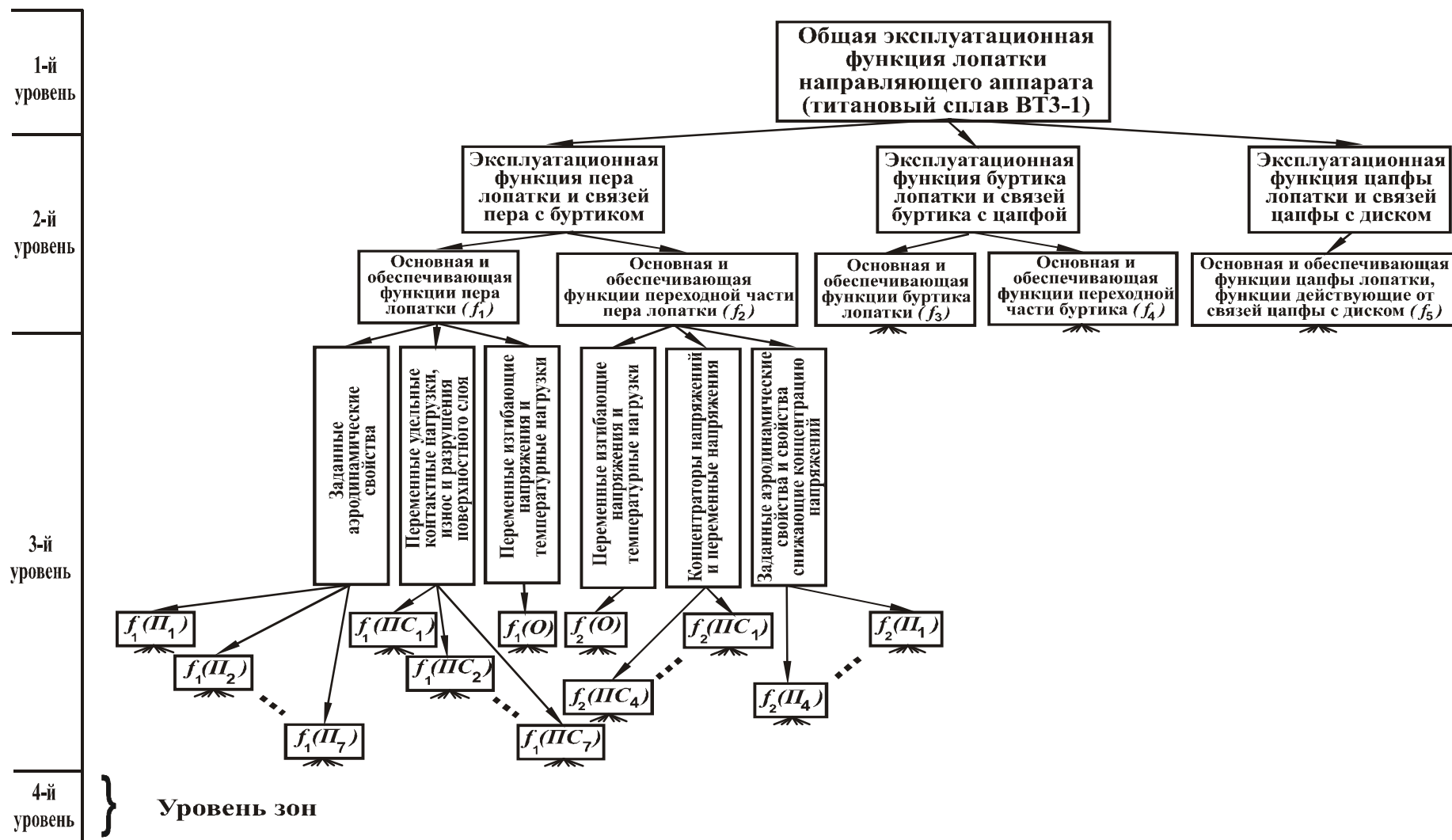
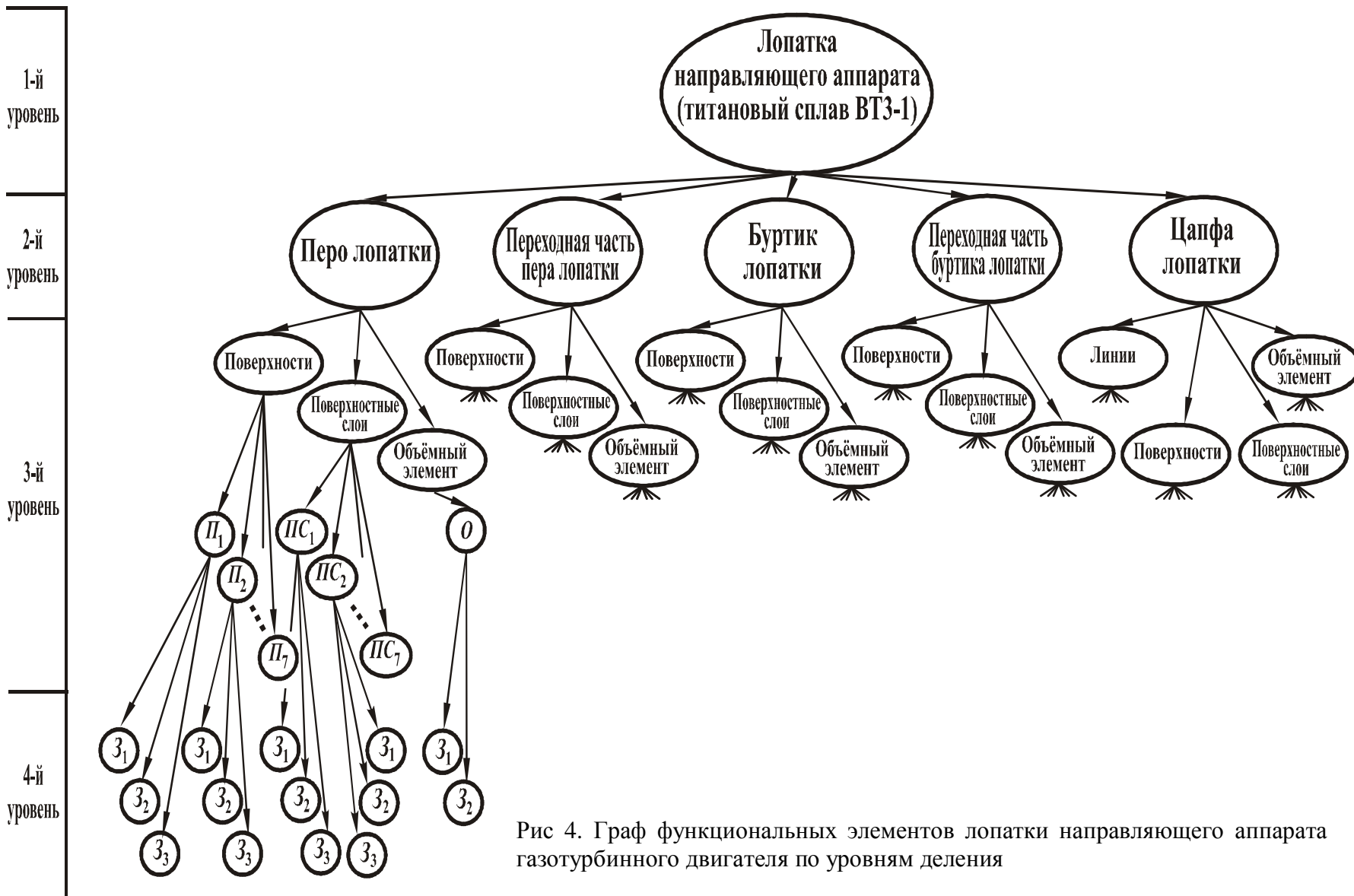


Рис 3. Граф эксплуатационных функций лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя по уровням деления



ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

На третьем этапе синтеза функционально-ориентированной технологии назначаются схемы технологического воздействия, разрабатываются операции и формируется весь технологический процесс изготовления изделия на базе особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств функциональных элементов в зависимости от особенностей эксплуатации изделия.

Можно отметить, что при реализации схем технологического воздействия и обеспечении необходимых свойств необходимо учитывать следующее:

- технологические воздействия и заданные свойства изделий должны реализовываться на местном уровне прецизионно, особо прецизионно и супер прецизионно;
- технологические воздействия и заданные свойства изделий должны выполняться в зависимости эксплуатации изделия в машине или технологической системе;
- технологические воздействия и заданные свойства изделий должны реализовываться по уровням глубины технологии;
- технологические воздействия и заданные свойства изделий должны выполняться на базе группы особых принципов ориентации.

Отметим, что в каждом конкретном случае выполнения функционально-ориентированной технологии должны реализовываться свои специальные схемы технологического воздействия и операции, причем в зависимости от особенностей эксплуатации изделия [5].

На рис. 5 приведена классификация особых свойств пера лопатки газотурбинного двигателя при реализации ФОТ.

Можно отметить, что свойства пера лопатки можно ориентировать в направлении его поверхности или параллельно ей. При этом свойства могут быть ориентируемые по высоте или по ширине. А также свойства пера лопатки можно ориентировать в направлении перпендикулярном его поверхности.

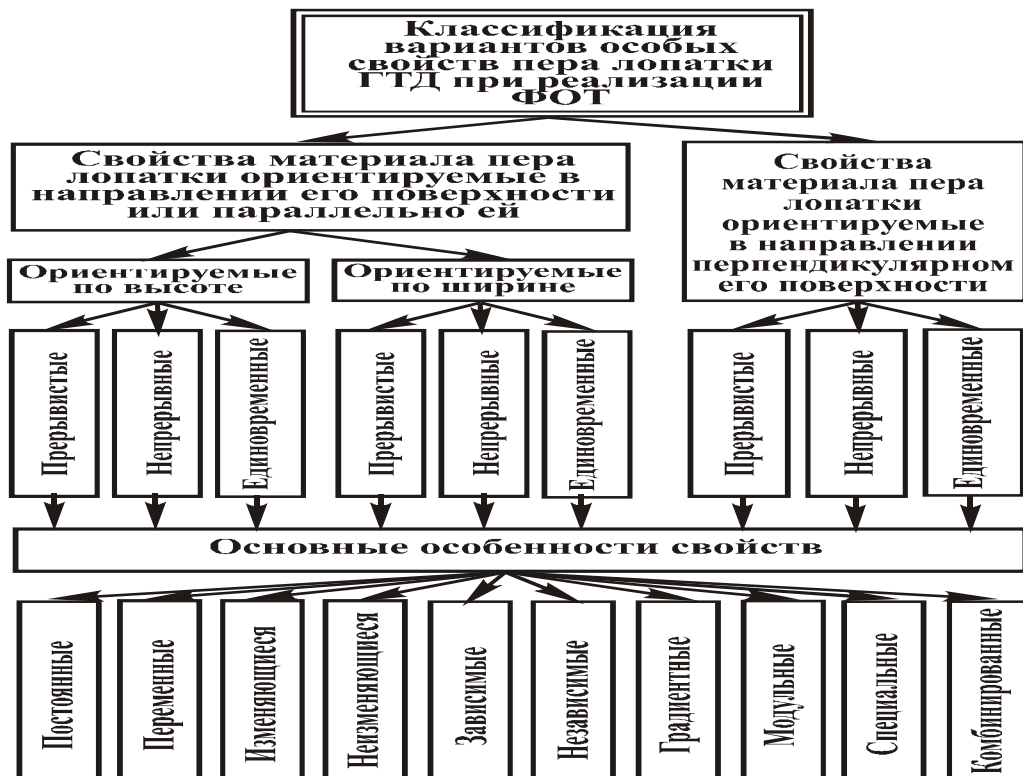


Рис. 5. Классификация особых свойств пера лопатки ГТД при реализации ФОТ

ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

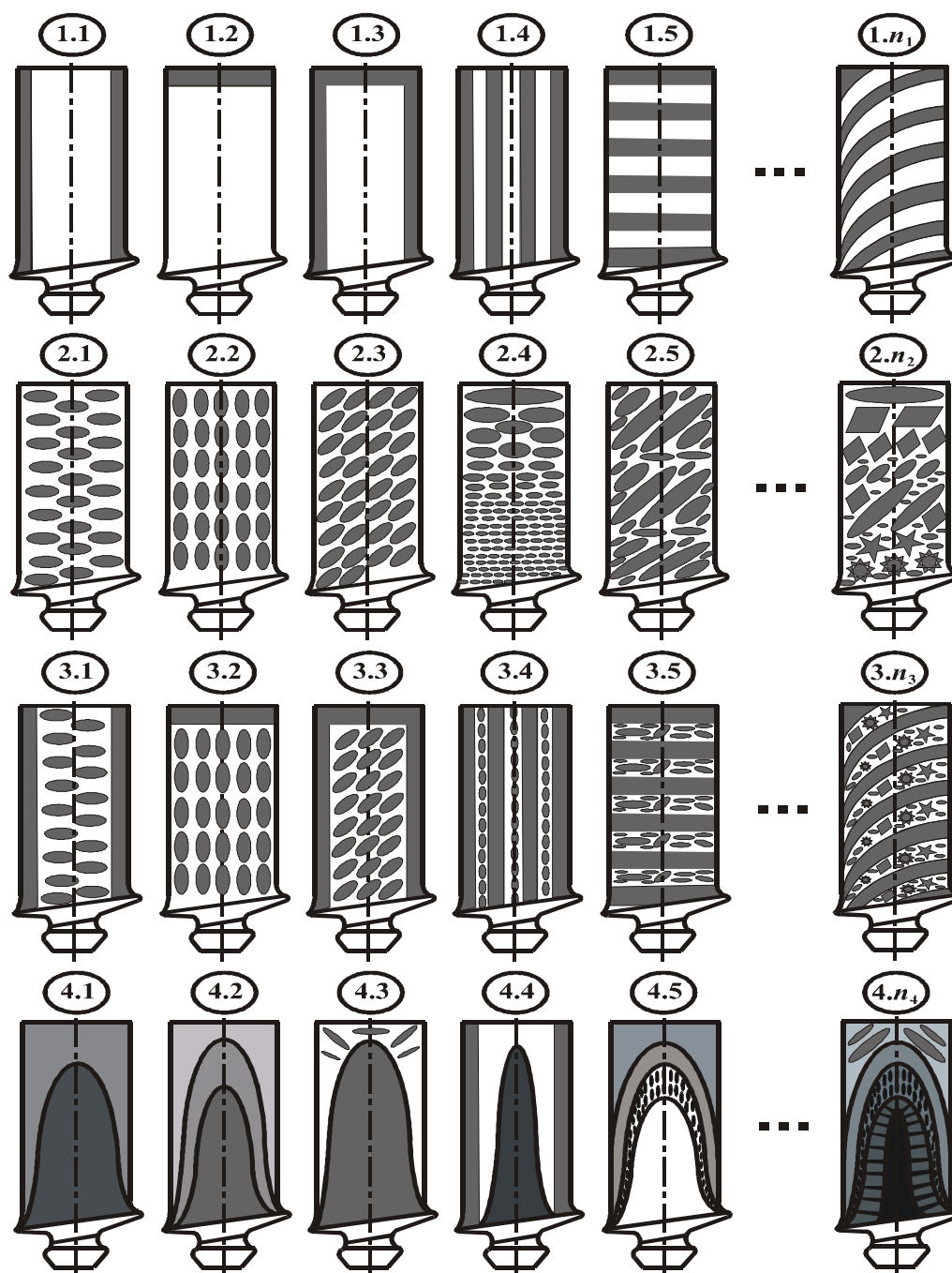


Рис. 6. Матрица структурных вариантов вакуумных ионно-плазменных покрытий пера лопаток газотурбинного двигателя

Получаемые свойства пера лопатки во всех случаях могут быть прерывистые, непрерывные или единовременные [5]. Основные особенности свойств могут быть следующие:

- постоянные или переменные,
- изменяющиеся или не изменяющиеся,
- зависимые или независимые,

ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- градиентные или модульные,
- специальные или комбинированные.

Например, для повышения эксплуатационных свойств лопаток ГТД широко применяются различные покрытия. На рис. 6 приведена матрица структурных вариантов вакуумных ионно-плазменных покрытий пера лопаток газотурбинного двигателя. Здесь показано следующее:

- множество вариантов полосчатых покрытий поверхности пера лопатки, изменяющихся в продольном, поперечном или комбинированном направлении;
- множество вариантов пятнистых покрытий пера лопатки;
- множество вариантов полосчатых и пятнистых покрытий пера;
- множество вариантов специальных покрытий пера лопатки.

Вакуумные ионно-плазменные покрытия [4] пера лопатки являются эффективными и относительно простыми для реализации. Они могут осуществляться на специальных установках, работа которых основана на процессах испарения генерируемого материала катодным пятном вакуумной дуги методом конденсации в вакууме на поверхность пера лопатки из плазменной фазы с ионной бомбардировкой – метод КИБ. Этот метод дает возможность наносить высокопрочные и износостойкие покрытия на поверхность пера лопатки и обеспечивать заданные эксплуатационные свойства.

Метод КИБ основан на том что плазменный поток металла образующийся с помощью вакуумной дуги с холодным катодом ускоряется путем приложения отрицательного потенциала к изделию с последующей конденсацией на нем ионов и нейтральных атомов при одновременном прохождении плазмо-химических реакций их с реактивным газом. Подавая в вакуумную камеру газ-реагент во время электродугового испарения тугоплавкого металла, можно получить покрытия на основе нитридов, карбидов и других соединений металлов IV – VI групп Периодической системы элементов.

В заключение можно отметить, что в данной работе выполнен анализ особенностей и основных этапов синтеза технологического процесса обработки лопаток газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода. Приведены структура эксплуатационных функций лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя и графы функциональных элементов по уровням деления лопатки ГТД. А также в работе предложена классификация особых свойств пера лопатки ГТД при реализации функционально-ориентированных технологий.

Список литературы: 1. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с. 2. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – Киев: Манускрипт, 1993. – 332 с. 3. Макаров В.Ф., Кочепанова Е.Н. Исследование вероятности прижогообразования при прецизионном полировании профиля пера титановых лопаток. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-20 сентября 2008 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2008. Т. 2. С. 240 – 243. 4. Михайлов А.Н. Общие особенности функционально-ориентированных технологий и принципы ориентации их технологических воздействий и свойств изделий // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17-22 сентября 2007 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2007. Т. 3. С. 38 – 52. 5. Михайлов А.Н. Функционально-ориентированные технологии. Особенности синтеза новых и нетрадиционных свойств изделий // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-20 сентября 2008 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2008. Т. 2. С. 290 – 314.