

УДК 621.794

Д.А. Михайлов, аспирант, А.В. Хандожко, д-р техн. наук, профессор,  
Е.А. Шейко, канд. техн. наук, доцент, А.П. Недашковский, инженер,  
А.Н. Михайлов, д-р техн. наук, профессор,  
Донецкий национальный технический университет,  
Брянский государственный технический университет, Россия,  
Снежнянский машиностроительный завод  
Тел./Факс: +38 (095) 0739343; E-mail: [arasamogon@mail.ru](mailto:arasamogon@mail.ru)

## ОБЩИЙ ПОДХОД В ОБЕСПЕЧЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД НА БАЗЕ ПРИНЦИПА ЕДИНОВРЕМЕННОГО ПОЛНОГО ИЗНОСА ПОКРЫТИЯ

*В данной статье разработан общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД. Предложено функционально-ориентированные свойства выполнять на базе специальных покрытий, свойства которых реализуются на базе принципа единовременного полного их износа в заданный период эксплуатации лопатки. В работе разработана модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа единовременного полного износа покрытия. А также приведены структурные варианты технологических процессов изготовления и восстановления лопаток. Для реализации функционально-ориентированных покрытий представлены основные этапы и операции отделочной обработки или восстановления лопатки.*

**Ключевые слова:** лопатка компрессора, технологический процесс, структурные варианты, принцип единовременного полного износа покрытия.

### 1. Введение

Проведенные исследования позволили установить, что в процессе эксплуатации лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) ее функциональные элементы изнашиваются неравномерно в результате действия эрозионно-коррозионных воздействий. При этом неравномерность износа покрытия по поверхности функциональных элементов пера лопатки может достигать до 2-х раз. Для повышения ресурса лопаток компрессора ГТД применяют множество различных методов отделочно-упрочняющей обработки [1 ... 3]. Наиболее перспективным методом является применение нитрид-титановых вакуумных ионно-плазменных покрытий пера лопатки [2, 3].

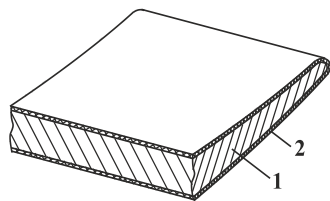


Рис. 1. Элемент лопатки компрессора с ионно-плазменным покрытием

На рис. 1 представлен элемент лопатки компрессора с ионно-плазменным покрытием. Здесь показано: 1 – тело пера лопатки, 2 – ионно-плазменное покрытие. Толщина покрытия лопаток компрессора составляет 5 ... 6 мкм. При этом выполненные исследования позволили установить, что применяемое нитрид-титановое покрытие в процессе эксплуатации лопаток имеет неравномерный износ. Причем наиболее изнашивается функциональный элемент пера лопатки находящийся в зоне входной кромки пера. А также поверхность корыта пера лопатки также имеет неравномерность износа, которая зависит от действующих функций. Кроме того, зона возле периферийной кромки также имеет неравномерность износа поверхности корыта пера лопатки.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что износ функциональных элементов пера лопатки компрессора имеет большую неравномерность, которая зависит от действующих эксплуатационных функций, которые определяются особенностями эксплуатации ГТД.

Целью данной работы является повышение ресурса и ремонтпригодности лопаток компрессора ГТД при их изготовлении и/или восстановлении, а также увеличение числа восстановлений в период их общего срока службы, за счет применения функционально-ориентированных покрытий, формируемых на пера лопатки на базе принципа единовременного полного износа покрытия и реализуемых посредством специального технологического обеспечения, структурируемого посредством закономерностей, действующих между операциями технологического процесса.

Для достижения поставленной цели в данной работе планируется решить следующие задачи: рассмотреть вопросы повышения ресурса лопаток компрессора, разработать методы повышения ресурса лопаток компрессора на основе применения функционально-ориентированных покрытий с использованием принципа единовременного полного износа покрытия (ЕПИП), разработать структурные варианты технологических процессов изготовления и восстановления лопаток компрессора с использованием функционально-ориентированных покрытий (ФОП).

Данная работа направлена на решение этих задач.

## 2. Особенности повышения ресурса лопаток компрессора

В данной работе предложено для повышения ресурса лопаток компрессора, имеющих неравномерный эрозионно-коррозионный износ функциональных элементов пера, использовать функционально-ориентированные ионно-плазменные покрытия [4]. В этом случае, процесс формирования структуры и особенностей ФОП планируется производить на базе принципа ЕПИП в заданный период эксплуатации лопатки компрессора. Здесь установлено, что использование принципа ЕПИП необходимо выпол-

нять как в период изготовления и эксплуатации новых лопаток, так и в период восстановления и эксплуатации изношенных лопаток.

На рис. 2 представлена гипотетическая модель, поясняющая процесс единовременного полного износа покрытия лопатки компрессора. В модели, на входе  $V$  в систему лопатки имеют функционально-ориентированное покрытие ( $\Pi = \text{ФОП}$ ), на выходе  $W$  - покрытия нет ( $\Pi = \varnothing$ ). В этом случае, ФОП в процессе эрозионно-коррозионного износа единовременно полностью изнашивается за период  $T$  на базе принципа ЕПИП. Процесс износа реализуется

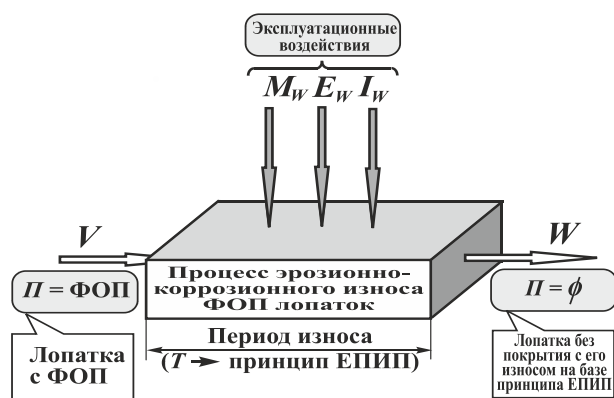


Рис. 2. Гипотетическая модель процесса единовременного полного износа покрытия лопатки

вследствие действия эксплуатационных воздействий, которые можно моделировать потоками материи  $M_w$ , энергии  $E_w$  и информации  $I_w$ .

Можно отметить, что процесс ЕПИП реализуется вследствие того, что покрытие имеет функционально-ориентированные свойства, которые обеспечиваются покрытием в функциональной зависимости от действия эксплуатационных функций. Поэтому при истечении периода  $T$ , покрытие единовременно полностью изнашивается. При этом при

восстановлении работоспособности лопатки не нужно удалять оставшееся покрытие, так как оно полностью самоулачивается. Это способствует повышению ресурса, ремонтно-пригодности и сохраняемости лопатки из-за действия износа.

Повышение ресурса лопатки обеспечивается за счет того, что при применении ФОП ресурс лопатки определяется длительность износа покрытия в зоне минимального износа покрытия по поверхности пера лопатки, а при традиционных покрытиях ресурс лопатки зависит от длительности износа покрытия в зоне максимального износа покрытия по поверхности пера лопатки (входная кромка). ФОП имеют переменные физико-механические свойства (ФМС) или переменную толщину по поверхности покрытия, параметры которого находятся в зависимости от действующих эксплуатационных функций. Это обеспечивает повышение ресурса лопаток компрессора как минимум в два раза.

Применение ФОП позволяет исключить местный износ тела пера лопатки, возникающий из-за неравномерного износа покрытия, и тем самым повысить сохраняемость тела пера лопатки по износу. При применении традиционных покрытий обычно происходит резкий износ покрытия и тела пера лопатки по входной кромке и по поверхности корыта. При применении ФОП обеспечивается возможность кардинального решения вопросов увеличения количества восстановлений лопатки компрессора и значительного повышения их срока службы. ФОП позволяет решать вопросы увеличения числа восстановлений свойств лопаток до 2 ... 4 раз.

Таким образом, ФОП напыляемые на лопатки компрессора на базе принципа ЕПИП существенно повышают технико-экономические параметры их эксплуатации за счет повышения ресурса их работы и увеличения числа возможных восстановлений.

Можно также отметить, что использование принципа ЕПИП в процессе изготовления, восстановления и эксплуатации лопаток компрессора в заданный период  $T$

позволяет решать вопрос единовременного полного износа покрытия и в процессе восстановления лопатки не нужно выполнять дополнительное удаление оставшегося покрытия. Это обеспечивает решение вопросов повышения производительности и качества восстановления лопаток компрессора.

На рис. 3 представлена модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа ЕПИП. Здесь показаны три составляющие процесса:

1 – эксплуатация лопаток, при которой происходит неравномерный износ покрытия;

2 – технологические воздействия при напылении ФОП;

3 – функционально-ориентированные свойства.

Эти процессы взаимосвязаны между собой по-

токами материи, энергии и информации, которые представлены связями  $F_i^j$ . Структурные составляющие модели рис. 3 связаны между собой на базе принципа ЕПИП, показанного позицией 4. Разработанная модель показывает, что реализация принципа

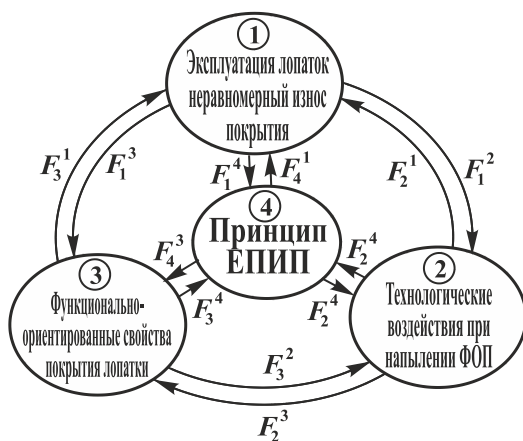


Рис. 3. Модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа ЕПИП

ЕПИП при изготовлении или восстановления лопаток компрессора возможно на базе связей в системе «эксплуатация-технологические воздействия-свойства».

### 3. Структура технологических процессов

На рис. 4 представлена структурная схема выполнения принципа единовременного полного износа функционально-ориентированного покрытия при изготовлении

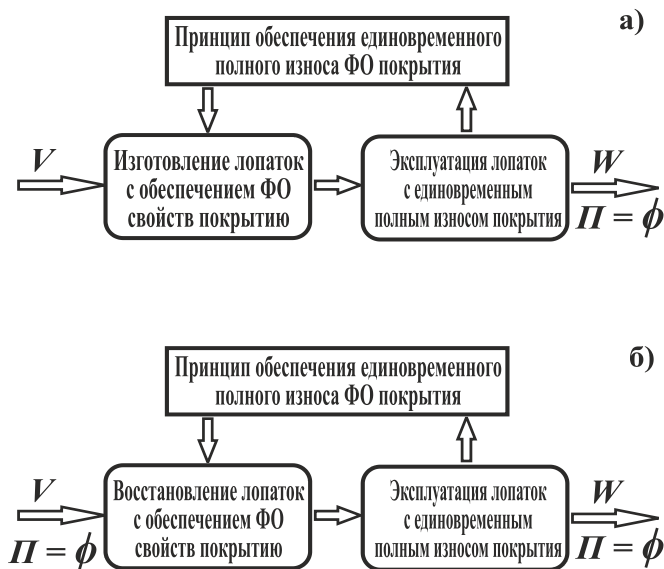


Рис. 4. Структурная схема выполнения принципа единовременного полного износа функционально-ориентированного покрытия при изготовлении или восстановлении лопаток и их эксплуатации: а – процесс изготовления лопаток, б – процесс восстановления лопаток

или восстановлении лопаток и их эксплуатации. Здесь показано: на рис. 4,а – процесс изготовления лопаток, на рис. 4,б – процесс восстановления лопаток. А также буквами показано следующее:  $V$  – входной поток,  $W$  – выходной поток,  $\Pi = \varnothing$  – обозначает, что покрытия нет (пустое множество).

На рис. 4,а показан этап изготовления лопаток с обеспечением функционально-ориентированных (ФО) свойств покрытию лопаток компрессора и эксплуатации лопаток с полным износом покрытия ( $\Pi = \varnothing$ ). При этом процесс формирования покрытия реализуется на базе принципа ЕПИП поэтому в процессе эксплуатации таких лопаток с покрытием происходит за период износа  $T$  процесс единовременного полного износа ФОП. Такие же особенности реализуются в про-

цессе восстановления и эксплуатации лопаток, основные характеристики которого приведены на рис. 4, б.

В случае, когда реализуется полный технологический процесс изготовления, восстановления и эксплуатации лопаток компрессора структура процесса может быть выполнена в соответствии со схемой, представленной на рис. 5. На рис. 5 представлена полная структурная схема процессов изготовления – эксплуатации и восстановления – эксплуатации лопатки на базе принципа ЕПИП

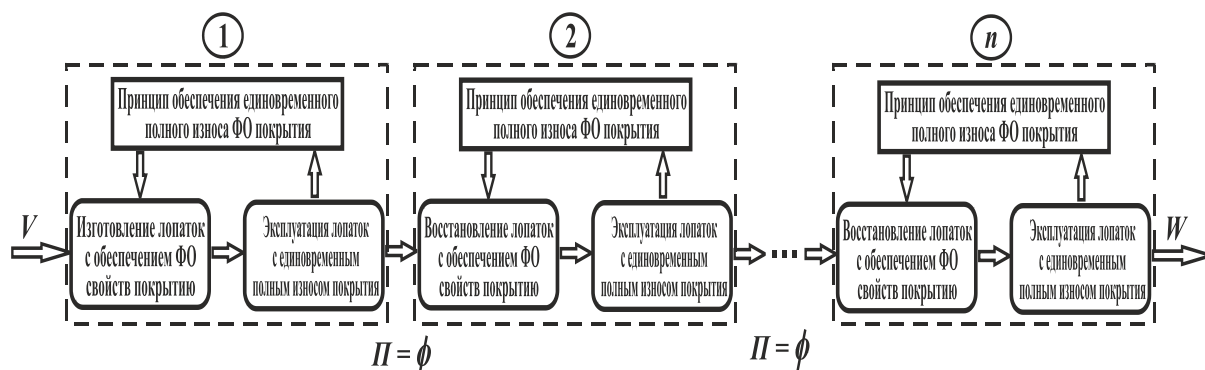


Рис. 5. Полная структурная схема процессов изготовления – эксплуатации и восстановления – эксплуатации лопатки на базе принципа ЕПИП

эксплуатации лопатки на базе принципа ЕПИП. Здесь показаны: 1, 2, ...,  $n$  - этапы изготовления и эксплуатации лопаток;  $V$  - вход лопатки в процесс;  $W$  - выход лопатки из процесса; ФО - функционально-ориентированные (свойства). На 1-м этапе выполняется процесс изготовления и эксплуатации лопаток, затем на 2-м и последующих этапах - восстановление и эксплуатация лопаток. На каждом из этапов реализуется ФОП и принцип ЕПИП. При этом после завершения каждого из этапов ФОП должно временно полностью изнашиваться ( $\Pi = \varphi$ ).

На рис. 6 представлены структурные варианты технологических процессов изготовления и восстановления лопаток компрессора: на рис. 6,а - традиционный вариант, на рис. 6,б - вариант, использующий на этапе восстановления лопаток ФОП, на рис. 6,в - вариант, использующий ФОП на всех этапах изготовления и восстановления лопаток.

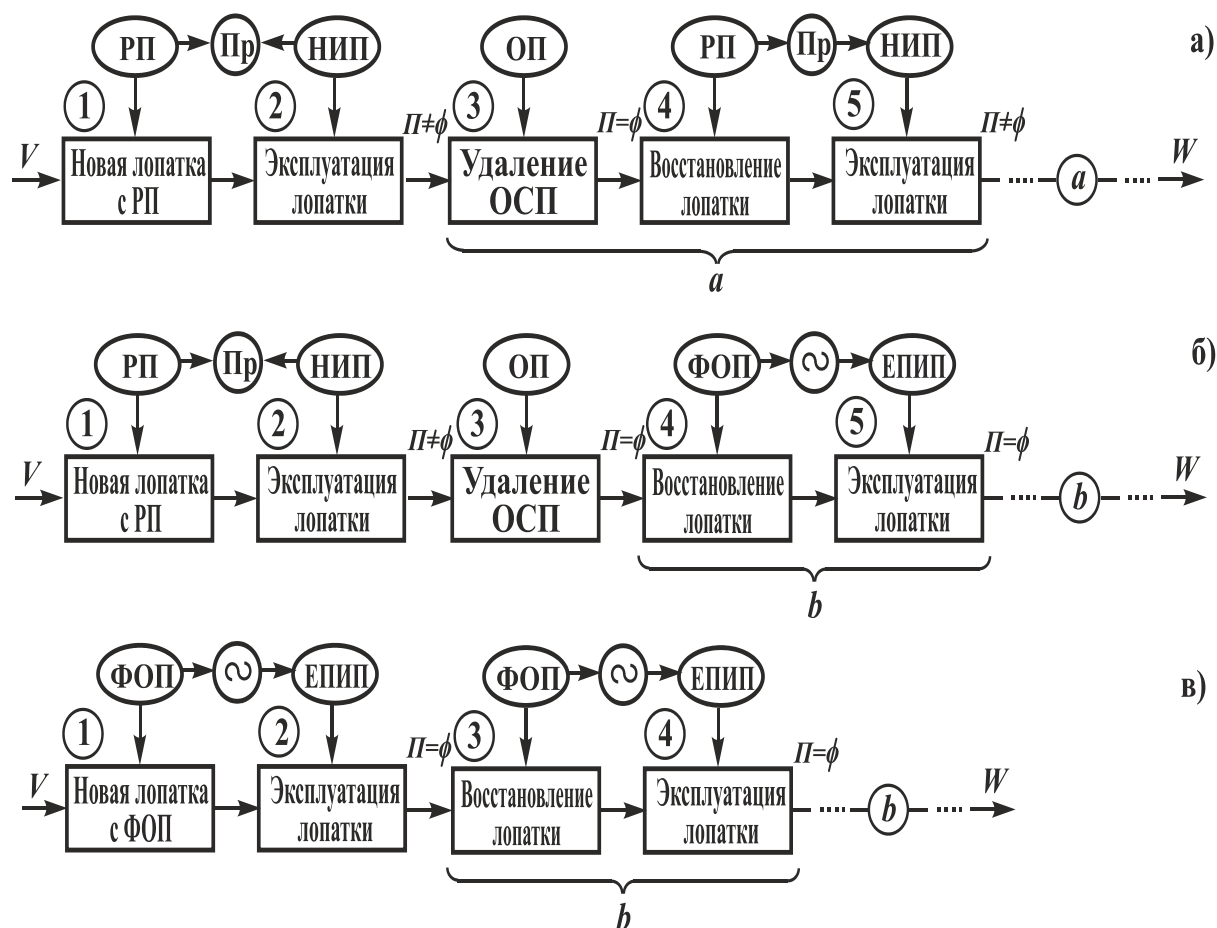


Рис. 6. Структурные варианты технологических процессов изготовления и восстановления лопаток компрессора:

а - традиционный вариант, б - вариант, использующий на этапе восстановления лопаток ФОП, в - вариант, использующий ФОП на всех этапах изготовления и восстановления лопаток.

РП - равнотолщинное покрытие, НИП - неравномерный износ покрытия, Пр - проблема, ОП - опорное полирование, ОСП - оставшееся покрытие,  $\Pi \neq \varphi$  - имеется остаточное покрытие,  $\Pi = \varphi$  - покрытие отсутствует,  $\odot$  - знак бинарного соответствия.

Первый структурный вариант технологического процесса изготовления и восстановления лопаток компрессора (рис. 6,а) – это традиционный вариант. Здесь, на позиции 1 технологического процесса для пера лопатки реализуется равнотолщинное покрытие (РП), на позиции 2 из-за особенностей эксплуатации лопатки происходит неравномерный износ покрытия (НИП), при этом происходит противоречие – проблема (Пр) между нанесенным РП и НИП, так как на входе покрытие равнотолщинное, а процесс износа происходит неравномерный, при этом на функциональных элементах пера лопатки остается неравномерное покрытие (ОСП)  $П \neq \varnothing$ . Поэтому на операции 4 должно выполняться опорное полирование (ОП) [5] оставшегося покрытия, которое имеет полный износ в зонах входной, выходной и периферийной кромках и на поверхности корыта пера лопатки. После операции полного удаления оставшегося покрытия на операции 4, покрытие с функциональных элементов полностью удаляется  $П = \varnothing$ . На этапе восстановления – эксплуатации повторяются те же проблемы, поэтому после эксплуатации лопаток необходимо каждый раз удалять оставшееся покрытие. При этом обычно наносимые покрытия имеют высокие параметры физико-механических свойств и их очень сложно удалять с поверхности пера лопатки. Наиболее перспективно этот процесс выполнять на базе опорного полирования (ОП) [5].

Во втором структурном варианте технологического процесса, представленного на рис. 6,б, позиции операций 1, 2 и 3 аналогичны позициям рис. 6,а. На операции 4 выполняется процесс восстановления пера лопатки с нанесением функционально-ориентированного покрытия (ФОП), свойства которого выполнены в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций и происходящим износом покрытия на позиции 4. В этом случае происходит единовременный полный износ покрытия за временной период  $T$  на базе принципа ЕПИП. При этом существует бинарное соответствие между свойствами ФОП и ЕПИП, поэтому по истечению периода  $T$  происходит единовременный полный износ покрытия. При последующих процессах восстановления лопаток подобные процессы могут неоднократно повторяться. Представленная структура технологического процесса (рис. 6,б) является более рациональной по сравнению с предыдущей структурой за счет возможности увеличенного количества восстановлений лопаток компрессора.

Структурная схема технологического процесса, представленная на рис. 6,в, является более перспективной по сравнению с предыдущими структурами, так как с самого начала реализуется ФОП и ЕПИП. Это позволяет увеличить количество восстановлений лопаток компрессора и в целом повысить их ресурс при эксплуатации.

На рис. 7 представлены основные этапы и операции отделочной обработки или восстановления лопатки компрессора. Здесь показано, что технологический процесс отделочной обработки или восстановления пера лопатки следует выполнять в три этапа:

- 1-й этап – обработка пера лопатки до напыления покрытий;
- 2-й этап – процесс напыления покрытий на функциональные элементы (ФЭ) пера лопатки;
- 3-й этап – обработка функциональных элементов пера лопатки после напыления покрытий.

Можно отметить, что на 1-м этапе технологического процесса при обработке пера лопатки до напыления покрытий могут выполняться следующие подэтапы:

- удаление оставшегося покрытия (химическое разрушение и травление покрытий, опорное полирование оставшегося покрытия);



- отделочная обработка функциональных элементов пера лопатки (предварительное и окончательное полирование).

На 2-м этапе технологического процесса выполняется напыление покрытий на функциональные элементы (ФЭ) пера лопатки. Здесь могут напыляться традиционные покрытия (равнотолщинное с постоянными свойствами по поверхности пера лопатки) или ФОП. Традиционные покрытия могут реализовываться однослойными или многослойными, а ФОП – многовариантные покрытия, число которых может быть достаточно большого количества – мощностью  $s$ .

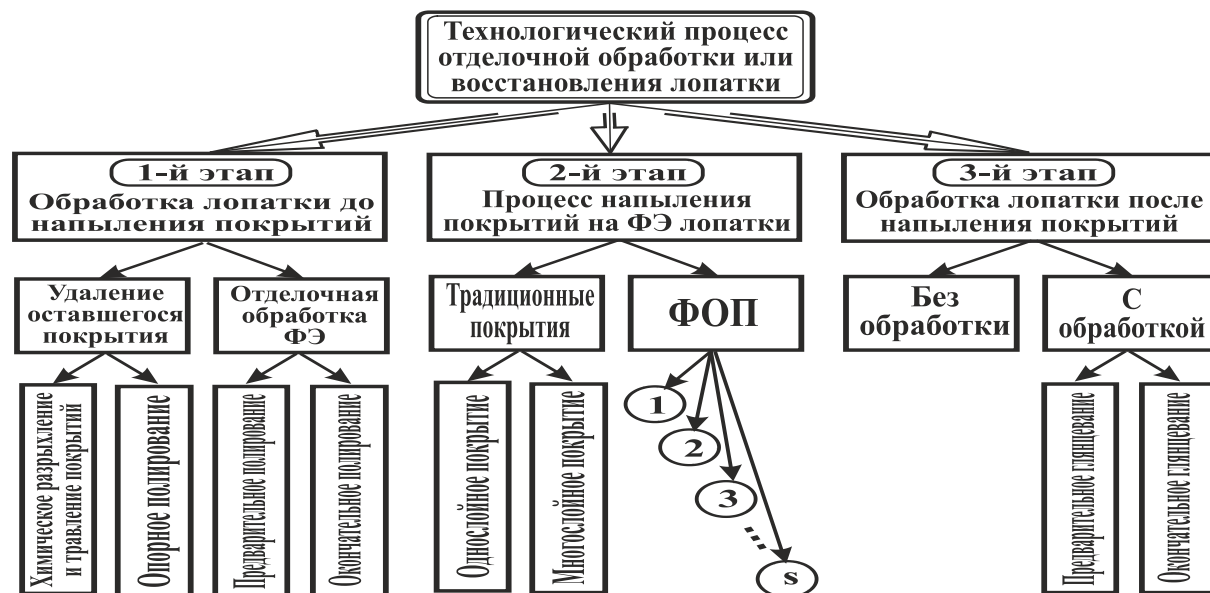


Рис. 7. Основные этапы и операции отделочной обработки или восстановления лопатки компрессора

3-й этап технологического процесса характеризуется тем, что он может выполняться без обработки и с обработкой. При этом дополнительная обработка может реализовываться посредством предварительного и окончательного глянцеования покрытия пера лопатки.

#### 4. Выводы

Выполненные исследования позволили разработать общий подход обработки и восстановления функциональных элементов пера лопатки на основе ФОП, обеспечивающих ЕПИП в период эксплуатации лопатки  $T$ . Это позволяет повысить ресурс лопаток до их восстановления и увеличить количество восстановлений. Все это существенно повышает общий ресурс лопаток компрессора при эксплуатации ГТД.

Таким образом, в данной работе выполнено следующее:

1. Рассмотрены вопросы повышения ресурса лопаток компрессора, при этом установлено, что наиболее перспективным является метод с применением ФОП, свойства которого реализуются на базе принципа ЕПИП.
2. Разработаны методы повышения ресурса лопаток компрессора на основе применения функционально-ориентированных покрытий с использованием принципа ЕПИП.
3. Представлены структурные варианты технологических процессов изготовления и восстановления лопаток компрессора с использованием ФОП.

**Список литературы:**

1. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с. ISBN 5-217-03119-0.
2. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с. ISBN 5-89594-066-8.
3. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д., Пухальская Г.В., Павленко Д.В., Бень В.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. - Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с. ISBN 966-7108-91-0.
4. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.
5. Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Недашковский А.П. Особенности полировки лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 1 (47). С. 207 - 212. ISSN 2073-3216.

Надійшла до редколегії 27.12.2014.

**D.A. Mikhaylov, A.V. Handozhko E.A., Sheiko, A.N. Mikhaylov**

**COMMON APPROACH TO PROVIDE FUNCTIONAL-ORIENTED FEATURES OF COMPRESSOR BLADES GTD BASED ON THE PRINCIPLE ONE-TIME FULL WEAR COATING**

*This article is designed to provide common approach functionally-oriented features of compressor blades of GTE. Recommend functionality-oriented features blades perform on the basis of special coatings, the properties of which are implemented based on the principle of one-time full of wear in a given period of operation of the blade. In this paper we developed a model of the relationships between the elements of "exploitation of technological impact-properties" in the implementation of the principle of one-time full wear. And given structural variants manufacturing processes and recovery compressor blades. To implement the function-oriented covers the main stages and operations finishing treatment or recovery compressor blades.*

**Key words:** compressor blades, process, structural variants, the principle of one-time full wear

**Д.О. Михайлов, О.В. Хандожко, О.О. Шейко, О.М. Михайлов**

**ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД НА БАЗІ ПРИНЦИПА ОДНОРАЗОВОГО ПОВНОГО ЗНОСУ ПОКРИТТЯ**

*У даній статті розроблено загальний підхід у забезпеченні функціонально-орієнтованих властивостей лопаток компресора ГТД. Запропоновано функціонально-орієнтовані властивості лопаток виконувати на базі спеціальних покриттів, властивості яких реалізуються на базі принципу одноразової повного їх зносу в заданий період експлуатації лопатки. У роботі розроблена модель взаємозв'язків між елементами системи «експлуатація-технологічний вплив-властивості» при реалізації принципу одноразової повного зносу покриття. А також наведені структурні варіанти технологічних процесів виготовлення та відновлення лопаток компресора. Для реалізації функціонально-орієнтованих покриттів представлені основні етапи та операції оздоблювальної обробки або відновлення лопатки компресора.*

**Ключеві слова:** лопатки компресора, технологічний процес, структурні варіанти, принцип одноразового повного зносу покриття.