

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Ивченко Т.Г., Михайлов Д.А., Недашковский А.П.

(ДонНТУ, СМЗ ОАО «Мотор Сич», г. Донецк, г. Снежное, Украина)

Тел./Факс: +38 (095) 0739343; E-mail: arasamogon@mail.ru

Abstract: *This article analyzed the features of operation of the compressor blades gas-turbine engine and shows the technological features of their recovery using functional- oriented coatings. The paper discusses the parameters of corrosion- erosion coating damage during operation of the compressor blades. Developed a universal structure recovery process blades made of titanium alloys with the application of PVD coatings. This process is structured in this paper on the main stage. To increase the resistance and uniform coating erosion damage during the operation provides for the use of function-oriented coatings.*

Keywords: *gas-turbine engine blades, recovery technology, PVD coatings, function-oriented coatings.*

Введение. Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) являются основными элементами современных авиационных двигателей, которые определяют ресурс и надёжность их эксплуатации в условиях совместного действия процессов газовой коррозии (высокотемпературное окисление, различные виды солевой коррозии) и эрозионных явлений, а также фазовых и структурных изменений свойств материала. Это обусловлено действием агрессивной газовой среды при высокой температуре, влажности, жидких частиц, пыли, песка и других частиц в воздушном потоке, что приводит к возникновению химико-абразивной эрозии элементов лопаток и выходу их из строя.

Также следует заметить, что элементы лопаток компрессора в процессе их эксплуатации испытывают напряжения растяжения и изгиба от центробежных сил, напряжения изгиба и кручения от газового потока, переменные напряжения от вибрационных нагрузок, частота и амплитуда которых изменяются в широких пределах, а также тепловые напряжения от тепловых нагрузок. При этом цикличность знакопеременных напряжений приводит к разрушению лопаток из-за возникающих микротрещин, а также фазовых и структурных изменений свойств материала [1, 2, 3].

Кроме того, лопатки компрессора (особенно лопатки I ступени компрессора) первыми воспринимают на себя действие крупных инородных тел, попавших в тракт двигателя [4, 5], что приводит к возникновению значительных ударных местных локальных напряжений и снижению ресурса их работы.

Таким образом, ресурс и надёжность работы ГТД в значительной степени определяется свойствами лопаток компрессора противостоять комплексному действию процессов газовой коррозии и эрозионных явлений, фазовых и структурных изменений свойств материала, температурных процессов, значительных переменных напряжений (различного вида) от действия вибрационных, циклических и ударных нагрузок.

Для современных двигателей, лопатки компрессора (рис. 1) изготавливают из специальных титановых сплавов со сложной пространственной формой пера, при этом они имеют тонкие входные и выходные кромки. Лопатки компрессора это одни из самых трудоёмких и дорогостоящих изделий ГТД. Это обусловлено тем, что для их изготовления применяются сложные технологии и дорогостоящие материалы, а также используется в одном двигателе большое количество лопаток [5].

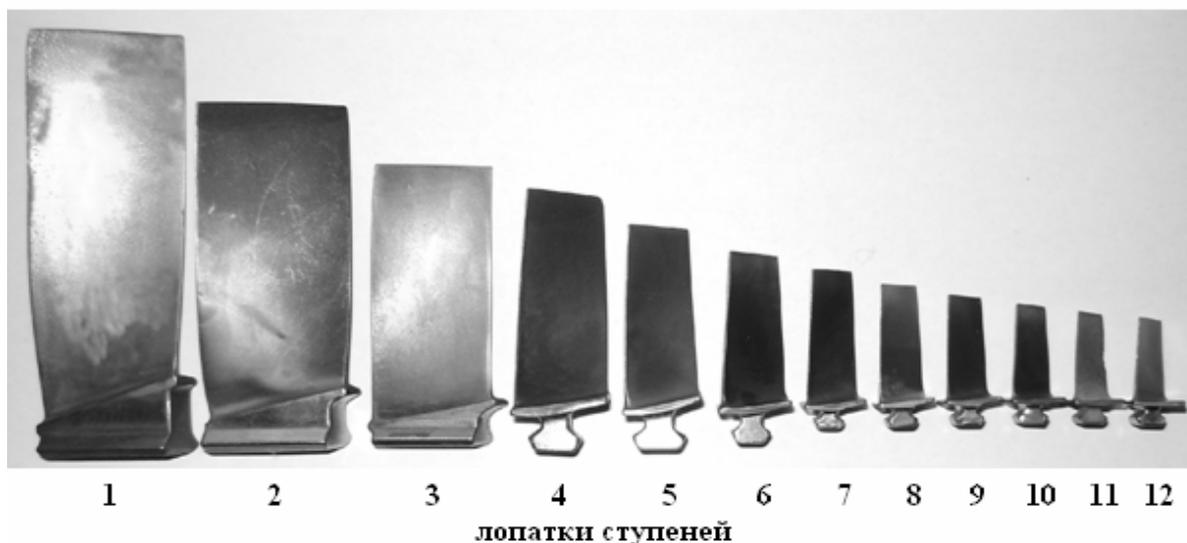


Рис. 1. Общий вид лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117

Для повышения ресурса и надёжности работы лопаток компрессора ГТД применяется целый комплекс различных отделочно-упрочняющих операций. Например, для снижения влияния коррозионно-эрозионных процессов при эксплуатации ГТД модели ТВ3-117, на лопатки компрессора наносят вакуумные ионно-плазменные покрытия. Эти покрытия позволяют значительно повысить ресурс их работы [5].

Выполненные исследования особенностей разрушения покрытия пера лопатки компрессора показывают, что в процессе эксплуатации ГТД покрытия разрушаются не равномерно по элементам и поверхностям лопатки (рис. 2). Этот процесс обусловлен пространственной формой элементов лопатки и кинематикой её движения, особенностями движения газовых потоков в тракте двигателя и действием частиц пыли и жидкости. Разрушение покрытия на лопатке обычно начинается на входной кромке 1 пера в зоне пересечения входной и периферийной кромок. Далее, разрушение покрытия распространяется от этой зоны по входной кромке вниз к замку лопатки и по периферийной кромке к выходной кромке 2. Затем, от этих зон начинает разрушаться покрытие на поверхности корыта 3 лопатки, и потом покрытие остаётся только в зоне 4 поверхности корыта лопатки. На рис. 2 представлена схема разрушения нитрид титанового покрытия поверхности пера лопатки со стороны корыта в зависимости от длительности эксплуатации (штриховые линии показывают границы полного разрушения покрытия, которые изменяются во времени): 1 – разрушения входной кромки пера, 2 – разрушения выходной кромки пера, 3 – поверхность без покрытия, 4 – поверхность с покрытием. Проведенные исследования выполнены на лопатках компрессора с нитрид титановым покрытием толщиной 5-6 мкм, нанесённые вакуумным ионно-плазменным методом при помощи титановых катодов ВТ 1-0. Здесь следует отметить, что покрытие пера лопатки имеет определённые закономерности разрушений в процессе эксплуатации лопаток в ГТД. Можно заметить, что покрытие, нанесённое на поверхность пера со стороны спинки меньше подвержено разрушению.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что при эксплуатации ГТД покрытия лопаток компрессора разрушаются не равномерно. Даже при

их длительной эксплуатации часть покрытия остается на поверхностях пера лопаток (рис. 2).

Причем в процессе эксплуатации лопатки, в местах полного разрушения покрытия, происходит интенсивное разрушение основного материала пера (тела) лопатки, тогда как в зонах, где покрытие не разрушено основной материал пера не подвергается разрушениям. Эти процессы неравномерного коррозионно-эрозионного разрушения приводят, в ряде случаев, к потере ремонтнопригодности лопаток.

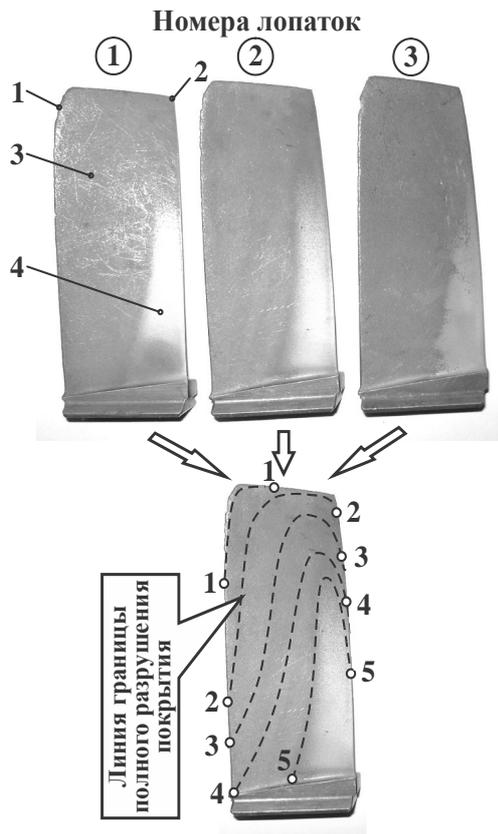


Рис. 2. Схема разрушения нитрид титанового покрытия поверхности пера лопатки со стороны корыта в зависимости от длительности эксплуатации: 1 – разрушения входной кромки пера, 2 – разрушения выходной кромки пера, 3 – поверхность без покрытия, 4 – поверхность с покрытием

выполнять изменяющиеся свойства покрытия по эрозионной стойкости, значение которой должно определяться в зависимости от степени разрушения покрытия в данной зоне лопатки при ее эксплуатации. В этом случае эрозионная стойкость покрытия может быть непрерывно изменяющейся или прерывисто изменяющейся - в соответствии с особенностями изменения величины разрушения покрытия в данной точке или в данной зоне пера лопатки.

Здесь можно отметить, что в случае обеспечения изменяющейся толщины или свойств покрытия обеспечивается полное разрушение покрытия на всех поверхностях и элементах пера лопатки в одно и то же время. Поэтому к моменту ремонта и восстановления лопатки все покрытие разрушается одновременно и его не нужно удалять с поверхностей или удалять с минимальными затратами.

Для повышения уровня ремонтнопригодности лопаток компрессора следует на этапах эксплуатации лопаток и нанесения покрытий выполнять следующее:

1. При равномерной толщине покрытия на поверхностях и элементах пера лопаток, необходимо обеспечивать длительность их эксплуатации только до появления первых признаков полного разрушения покрытия в зонах повышенного его разрушения.

2. Для обеспечения полного эксплуатационного потенциала покрытия пера лопатки, в условиях неравномерности разрушения покрытия по различным зонам лопатки, необходимо выполнять изменяющуюся толщину покрытия, величина которой должна определяться в зависимости от степени разрушения покрытия в данной зоне лопатки при ее эксплуатации.

3. Для обеспечения полного эксплуатационного потенциала покрытия пера лопатки, в условиях неравномерности разрушения покрытия по различным зонам лопатки, необходимо

выполнять изменяющиеся свойства покрытия по эрозионной стойкости, значение которой должно определяться в зависимости от степени разрушения покрытия в данной зоне лопатки при ее эксплуатации.

Здесь можно отметить, что в случае обеспечения изменяющейся толщины или свойств покрытия обеспечивается полное разрушение покрытия на всех поверхностях и элементах пера лопатки в одно и то же время. Поэтому к моменту ремонта и восстановления лопатки все покрытие разрушается одновременно и его не нужно удалять с поверхностей или удалять с минимальными затратами.

Целью данной работы является разработка технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий, обеспечивающих повышение стойкости работы лопаток в сложных условиях эксплуатации.

Для достижения поставленной цели в данной работе определены следующие задачи:

1. Выполнить анализ особенностей коррозионно-эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД с ионно-плазменными покрытиями.
2. Разработать универсальную структуру технологического процесса восстановления лопаток компрессора с ионно-плазменными покрытиями.
3. Предложить схему формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток компрессора ГТД. Разработать схему построения структуры многослойного покрытия на рабочих элементах пера лопатки. \
4. Разработать рекомендации по формированию структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД.

Эти задачи решаются в данной работе.

Универсальная структура технологического процесса восстановления лопаток компрессора

Можно отметить, что в ГТД лопатки компрессора могут использоваться без покрытий и с вакуумными ионно-плазменными покрытиями, нанесенными на основе нитрид титана. При эксплуатации ГТД возможны следующие случаи износа ионно-плазменных покрытий на лопатках компрессора:

- покрытие не имеет зон полного износа и разрушений,
- покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках пера лопатки,
- покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках и поверхностях пера лопатки.

Можно отметить, что в последнем случае разрушения покрытия, начинается процесс интенсивного коррозионно-эрозионного разрушения материала тела лопатки, которые приводят к потере ремонтпригодности лопаток компрессора в целом. Поэтому в этом случае необходимо выполнять тщательный осмотр и дефектацию лопаток с учетом их ремонтпригодности (рис. 3).

В зависимости от особенностей разрушения вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхностях пера лопатки составляет своя структура технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД. Поэтому структура этого технологического процесса многовариантна, она строится с учетом наличия или отсутствия старых покрытий, степени разрушения покрытия и особенностей нанесения нового вакуумного ионно-плазменного покрытия. Также следует отметить, что структура технологического процесса может включать азотирование лопаток, которое является эффективным средством дополнительного повышения стойкости лопаток компрессора.

На рис. 3 представлена универсальная структура технологического процесса восстановления лопаток из титановых сплавов ГТД ТВ3-117 с нанесением ионно-плазменных покрытий. Здесь показано: V – вход технологического процесса; W – выход технологического процесса; v_{11} – вход 11-й операции; w_{10} – выход 10-й операции.

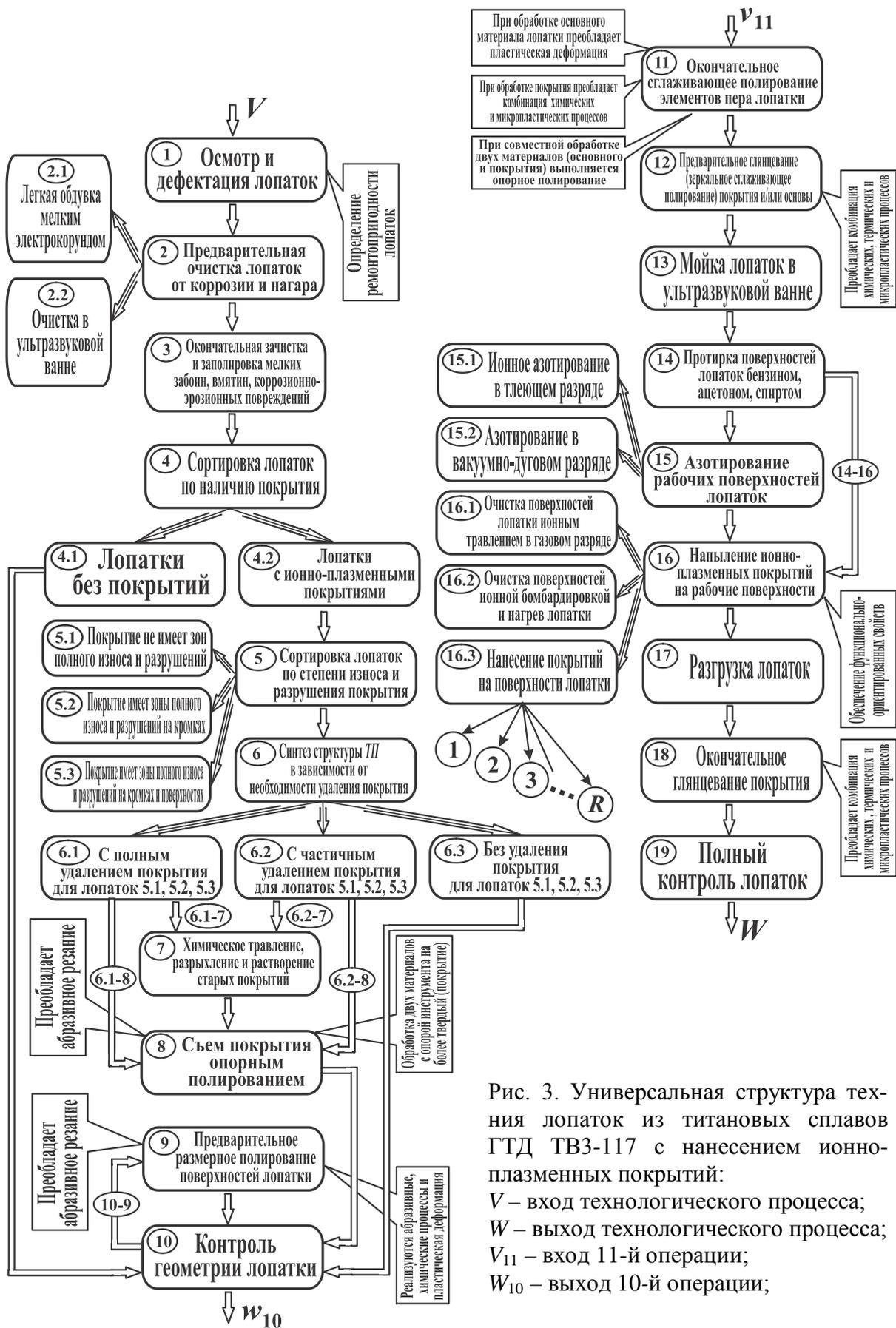


Рис. 3. Универсальная структура техника лопаток из титановых сплавов ГТД ТВ3-117 с нанесением ионно-плазменных покрытий:

V – вход технологического процесса;
 W – выход технологического процесса;
 V_{11} – вход 11-й операции;
 W_{10} – выход 10-й операции;

Универсальная структура технологического процесса восстановления лопаток (рис. 3) содержит следующие операции:

1. Осмотр и дефектация лопаток. На этом этапе определяется ремонтпригодность лопаток в целом.

2. Предварительная очистка лопаток от коррозии и нагара. Очистка элементов и поверхностей лопаток может выполняться:

2.1. Посредством легкой обдувки мелким электрокорундом или карбидом кремния черным или зеленым на основе пневмо абразивно-струйной обработки.

2.2. За счет очистки в ультразвуковой ванне.

3. Окончательная зачистка и заполировка мелких забоин, вмятин, коррозионно-эрозионных повреждений.

4. Сортировка лопаток по наличию покрытия:

4.1. Лопатки без покрытия. Если лопатки без покрытия, то они направляются на контроль геометрии лопаток.

4.2. Лопатки с вакуумными ионно-плазменными покрытиями.

5. Сортировка лопаток по степени износа и разрушения покрытия.

5.1. Покрытие не имеет зон полного износа и разрушений,

5.2. Покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках пера лопатки,

5.3. Покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках и поверхностях пера лопатки.

6. Синтез структуры технологического процесса (ТП). Здесь структура определяется в зависимости от необходимости удаления покрытия:

6.1. С полным удалением покрытий для лопаток по пунктам 5.1, 5.2, 5.3. Здесь возможно два варианта удаления покрытия.

6.2. С частичным удалением покрытий для лопаток по пунктам 5.1, 5.2, 5.3. Здесь возможно два варианта удаления покрытия.

6.3. Без удаления покрытия для лопаток по пунктам 5.1, 5.2, 5.3. Если лопатки без покрытия, то они направляются на контроль геометрии лопаток.

7. Химическое травление, разрыхление и растворение старых покрытий.

8. Съем покрытия опорным полированием.

В этом случае полирование имеет определенные особенности, связанные с тем, что обработка выполняется одновременно двух разнородных по свойствам материалов, а именно, особо твердого нитрида титанового покрытия с микротвердостью $H_{\mu} = 21 \dots 25$ ГПа и более мягкого титанового сплава ВТ 8М с микротвердостью $H_{\mu} = 1,2 \dots 1,5$ ГПа. При одновременной обработке двух различных по твердости материалов их обработка должна выполняться с опорой инструмента (полировального круга) на более твердый материал (на покрытие). Это обусловлено тем, что при обработке покрытия необходимо в 2-3 раза большее усилие прижима полировального круга, чем при обработке титанового сплава. В момент полного удаления покрытия возможно продавливание титанового сплава, так как усилие прижима полировального круга для титанового сплава должно быть значительно меньшим. Поэтому обрабатываемая поверхность пера лопатки получает значительную бугристость (бугристая волнистость). При опорном полировании должно преобладать абразивное резание. В целом полирование характеризуется абразивными, химическими, пластическими и термическими процессами.

9. Предварительное размерное полирование поверхностей лопатки. На этой операции выполняется восстановление геометрии лопатки, нарушенной на этапах эксплуатации или обработке поверхностей. В этом случае должно преобладать абразивное резание. Эта операция выполняется после контроля геометрии лопаток. Параметры шероховатости $R_a = 0,4 \dots 0,16$ мкм.

10. Контроль геометрии лопаток.

11. Окончательное сглаживающее полирование элементов пера лопатки. Для нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, элементы и поверхности пера лопатки необходимо подготовить к нанесению покрытия и обеспечить заданные параметры шероховатости $R_a = 0,100 \dots 0,063$ мкм. На этой операции возможны три характерных случая обработки. При обработке только основного материала лопатки, а именно титанового сплава ВТ 8М, преобладает пластическая деформация материала. При обработке только покрытия, а именно нитрид титанового покрытия, преобладает комбинация химических и микропластических процессов. При совместной обработке двух материалов (основного и покрытия) выполняется опорное полирование.

12. Предварительное глянцеование (зеркальное сглаживающее полирование) покрытий и/или основного материала пера лопатки. На этой операции преобладает комбинация химических, термических и микропластических процессов. Параметры шероховатости на этой операции составляют следующие величины $R_a = 0,050 \dots 0,032$ мкм.

13. Мойка лопаток в ультразвуковой ванне. На поверхности пера лопатки остаются загрязнения и окислы, которые необходимо удалить и очистить поверхности от их наличия. Этот процесс выполняется с помощью ультразвуковой обработки в специальных ваннах. В качестве источника колебаний применяется установка ультразвуковых колебаний УЗГ 3-4 и магнестрикционные преобразователи ПМС 2,5-18. В качестве обрабатываемой жидкости в ванне используется раствор следующего состава: тринатрийфосфат технический – 30-40 г/л; сода кальцинированная техническая 20-30 г/л; поверхностно активное вещество ОП-7 или ОП-10 – 3,5 г/л. Температура раствора 50-60°C. Далее выполняется промывка лопаток под проточной водой.

14. Протирка пера лопатки бензином, ацетоном и спиртом. Сначала лопатка обрабатывается бензином «Галоша» (БР-1) ГОСТ 443-76, затем эфиром и потом выполняется их промывка в спирте этиловом ректификационном.

15. Азотирование рабочих поверхностей лопаток. Азотирование поверхностей необходимо для упрочнения материала лопатки, обеспечения необходимых структурных и фазовых свойств материала лопаток после их эксплуатации. В этом случае азотирование лопаток компрессора целесообразно выполнять следующими методами:

15.1. Ионное азотирование в тлеющем разряде.

15.2. Азотирование в вакуумно-дуговом разряде.

Эти процессы реализуются с помощью вакуумных ионно-плазменных установок, например ННВ 6.6-И1. Использование этих установок позволяет сразу реализовать после азотирования нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Операция азотирования в данном технологическом процессе не обязательна и может не выполняться.

16. Нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности пера лопатки. Нанесение покрытий выполняется на базе вакуумных ионно-плазменных установок, например ННВ 6.6-И1. Основные этапы нанесения покрытий следующие:

16.1. Очистка поверхностей лопатки ионным травлением в газовом разряде.

16.2. Очистка поверхностей ионной бомбардировкой и нагрев лопаток.

16.3. Нанесение покрытий на поверхности лопатки. Процесс нанесения покрытий может быть многовариантным, число различных вариантов может быть 1, 2, 3, ..., R . Это могут быть однослойные покрытия и многослойные покрытия, одноэлементные (типа TiN , TiC) и многоэлементные (типа $(Ti,Al)N$, $(Ti,Zr)N$) покрытия, многокомпонентные (типа $TiCN$, $ZrCN$) покрытия, а также композиционные покрытия (типа $(Ti,Al)CN$, $(Ti,Zr)CN$). Кроме того, для повышения стойкости покрытий к коррозионно-эрозионным процессам при эксплуатации лопаток рекомендуется нанесение функционально-ориентированных покрытий [6].

17. Разгрузка лопаток.

18. Окончательное глянцевање (зеркальное сглаживающее полирование) покрытий. На этой операции преобладает комбинация химических, пластических и микропластических процессов. Параметры шероховатости на этой операции составляют следующие величины $R_a = 0,040 \dots 0,020$ мкм.

19. Полный контроль лопаток.

Представленная структура технологического процесса для восстановления лопаток компрессора ГТД является универсальной. На базе этой структуры выполняется выбор конкретных вариантов процессов для восстановления лопаток компрессора с нанесением новых вакуумных ионно-плазменных покрытий для различных случаев наличия на лопатках старых покрытий.

Универсальная структура технологического процесса нанесения новых покрытий включает возможность их нанесения с функционально-ориентированными свойствами [6], обеспечивающими предельный эксплуатационный потенциал использования лопаток в ГТД. Однако для реализации функционально-ориентированных покрытий на лопатки необходимы дополнительные исследования, которые будут представлены далее в этой работе.

Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств покрытиям лопаток компрессора. На рис. 4 представлена схема разрушения старого и последовательного формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия на 6-ти этапах – по одному на каждом. На схеме разрушения старого покрытия показана зона начала полного разрушения покрытия $1-a_1-b-1^1$, которая последовательно распространяется до зоны $2-1-a_1-b-1^1-2^1-a_2$, затем до зоны $3-2-1-a_1-b-1^1-2^1-3^1-a_3$ и так далее до зоны $5-4-3-2-1-a_1-b-1^1-2^1-3^1-4^1-5^1-a_n$. В соответствии с этими особенностями разрушения покрытия при эксплуатации лопатки в работе предлагается последовательно формировать многослойное покрытие с топологической ориентацией каждого слоя покрытия на поверхности пера лопатки, в соответствии с особым принципом ориентации покрытия, предложенным в работе [6]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} : G(F) &\rightarrow G(TB); \\ \varphi_{22} : G(TB) &\rightarrow G(C); \\ \varphi_{23} : G(C) &\rightarrow G(F), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где φ_{21} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ изделия в геометрические параметры зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$;

φ_{22} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$ в геометрические параметры зоны обеспечения свойств $G(C)$ изделия;

φ_{23} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны обеспечения свойств $G(C)$ в геометрические параметры зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ изделия.

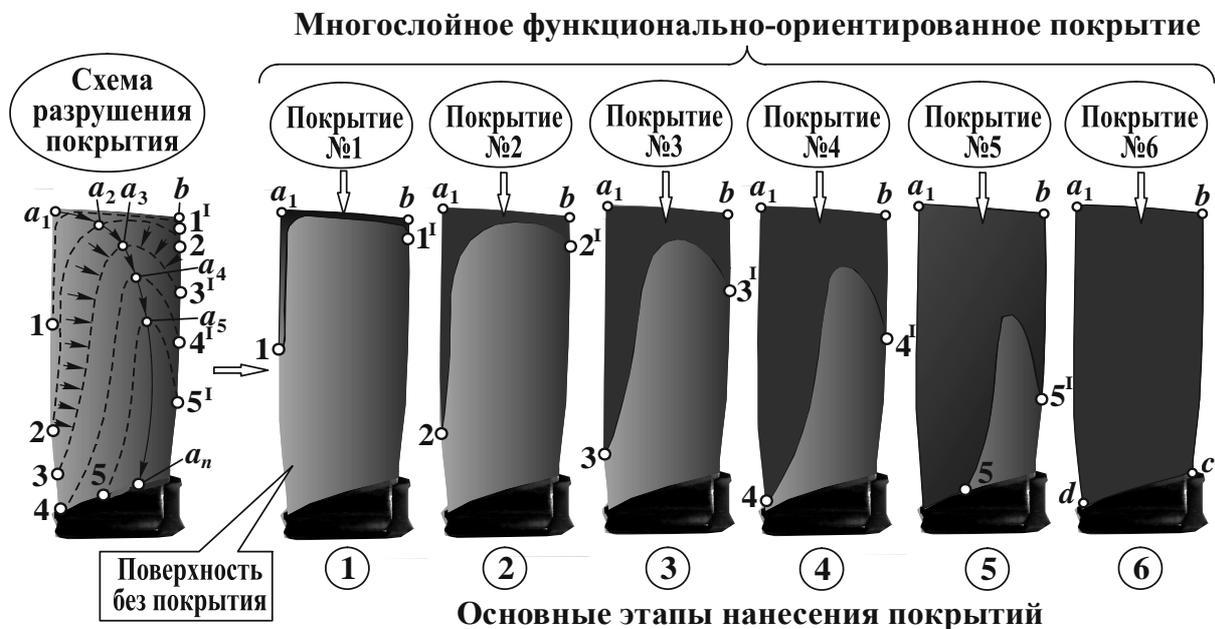


Рис. 4. Схема формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия

Таким образом, многослойное покрытие (рис. 5) формируется в результате последовательного нанесения однослойных покрытий на каждом этапе с учетом выражения 1 топологической ориентации покрытия каждого слоя (рис. 4). Здесь, наносится покрытие №1 с топологической ориентацией его на поверхности в соответствии со схемой износа, затем покрытие №2, далее покрытие №3 и так далее, в конце наносится покрытие на все поверхности пера лопатки. В этом случае, свойства каждого покрытия может определяться в соответствии с выражением:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} : F &\rightarrow TB ; \\ \varphi_{12} : TB &\rightarrow C ; \\ \varphi_{13} : C &\rightarrow F , \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где φ_{11} - отображение (преобразование) эксплуатационной функции F изделия в технологические воздействия TB ;

φ_{12} - отображение (преобразование) технологических воздействий TB в свойства C изделия;

φ_{13} - отображение (преобразование) свойств C в технологические воздействия TB .

Многослойные покрытия, сформированные в соответствии с выражениями (1) и (2) обладают свойствами разрушения в заданный период эксплуатации лопаток компрессора ГТД. Это позволяет в длительный период времени исключить возможность разрушения основного материала пера лопатки и одновременно повысить технико-экономические показатели их восстановления.

Анализ структурных вариантов технологических процессов и основные рекомендации. Анализируя универсальную структуру технологического процесса восстановления лопаток компрессора из титановых сплавов с нанесением ионно-плазменных покрытий, представленную на рис. 3, можно отметить следующее.

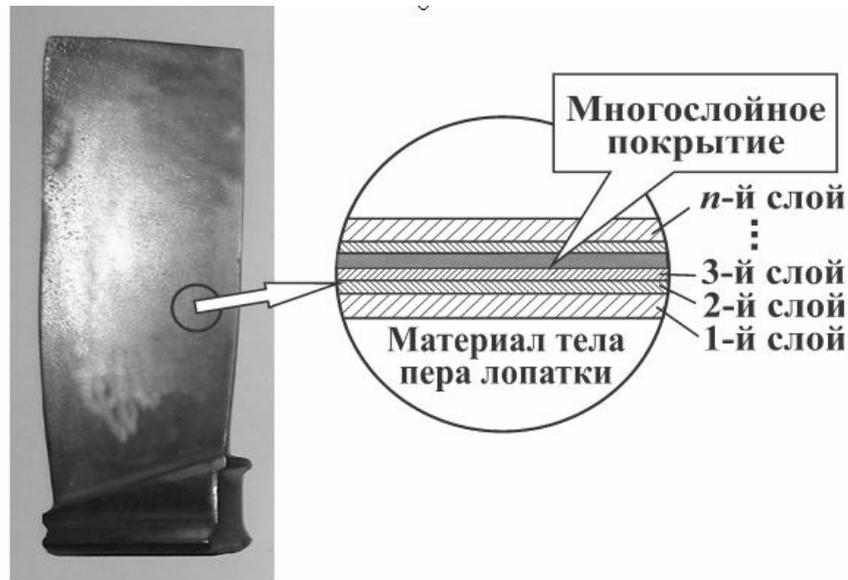


Рис. 5. Схема построения структуры многослойного покрытия на рабочих элементах пера лопатки

1. Разработка технологического процесса восстановления лопаток и формирование его структуры определяется начальными свойствами лопаток и особенностями их эксплуатации.

2. Разработанная структура универсального технологического процесса базируется на ряде основных этапов:

- удаление коррозионно-эрозионных разрушений и нагара на перо лопатки, образованных при эксплуатации ГТД;
- полное или частичное удаление старых покрытий,
- восстановление геометрии пера лопатки, подготовка и обеспечение требуемых параметров качества поверхностей и поверхностного слоя пера лопатки для нанесения нового покрытия;
- нанесение покрытий на перо лопатки с обеспечением заданных эксплуатационных свойств;
- окончательное обеспечение параметров качества поверхностей и элементов пера лопатки.

3. Операция отделочной механической обработки элементов пера лопатки имеет определенные особенности, связанные с совместной обработкой двух разнородных материалов, имеющих значительное различие своих свойств.

4. Ионно-плазменные покрытия пера лопатки может реализовываться следующих вариантов:

- в зависимости от применяемого материала: одноэлементные и многоэлементные, многокомпонентные и композиционные;
- в зависимости от количества слоев: однослойные и многослойные;
- в зависимости от вида покрытий: традиционные и функционально-ориентированные покрытия;
- функционально-ориентированные покрытия могут иметь следующие свойства: функционально-зависимые, функционально независимые, специальные свойства, другие свойства.

5. Значение толщины, геометрические параметры, топография, структура и свойства покрытия поверхностей и элементов лопатки должны определяться из условия

его одновременного полного коррозионно-эрозионного разрушения в любой точке пера лопатки или в зависимости от действия эксплуатационных функций.

6. В целом функционально-ориентированные свойства покрытий лопаток должны формироваться в зависимости от особенностей эксплуатации лопатки и коррозионно-эрозионных разрушений покрытия в каждой точке пера.

Заключение. Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. В работе выполнен анализ особенностей коррозионно-эрозионных разрушений лопаток ГТД с ионно-плазменными покрытиями. При этом установлено, что эти разрушения покрытий имеют определенные закономерности. Для повышения стойкости лопаток от коррозионно-эрозионных разрушений предложено наносить функционально-ориентированные покрытия.

2. Для повышения эффективности восстановления лопаток компрессора ГТД разработана универсальная структура технологического процесса восстановления лопаток с ионно-плазменными покрытиями. Разработанный технологический процесс структурирован по 5-ти основным этапам, каждый из которых имеет определенные технологические особенности. При этом установлено, что для обеспечения высокой адгезионной прочности (до 250 МПа) сцепления формируемых новых покрытий с не удаленными оставшимися покрытиями на поверхностях пера, а также с материалом пера лопатки (подложка), необходимо выполнять предварительное глянцеование (зеркальное сглаживающее полирование) покрытия и/или основного материала элементов пера лопатки с параметрами шероховатости $R_a = 0,050 \dots 0,032$ мкм.

3. В работе предложена схема формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток компрессора ГТД. При этом разработана схема построения структуры многослойного покрытия на рабочих элементах пера лопатки.

4. В представленной работе выполнен анализ структурных вариантов покрытий, обеспечивающих повышение уровня ремонтпригодности лопаток компрессора ГТД, а также даны рекомендации формирования структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД.

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. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с. ISBN 5-217-03340-1. 3. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с. ISBN 5-89594-066-8. 4. Богуслаев В.А., Качан А.Я., Долматов А.И., Мозговой В.Ф., Корневский Е.Я. Технология производства авиационных двигателей. Ч. 1. Основы технологии. - Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 518 с. ISBN 966-87-2. 5. 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. 6. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.