

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

¹ Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., ² А. П. Пичко, аспирант,¹ Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц., ² А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.¹ ГОУ ВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР² ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНРТел.: +38 071 3060879; E-mail: mntk21@mail.ru

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

В статье приведены данные по повышению ресурса лопаток газотурбинных установок на базе функционально-ориентированных покрытий и принципа равенства ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины. Представлена методика синтеза технологического обеспечения для выполнения функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора и турбины. Разработан алгоритм синтеза функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора и турбины на основе связей их параметров.

Ключевые слова: синтез, методика, алгоритм, ресурс, лопатка, газотурбинная установка, нефтегазовая промышленность.

D. A. Mikhaylov, A. P. Pichko, E. A. Sheyko, A. N. Mikhaylov

METHODOLOGY AND ALGORITHM OF SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL PROVIDING OF COMPLEX INCREASE OF RESOURCE OF SHOULDER-BLADES OF TURBO-COMPRESSOR OF GAS-TURBINE INSTALLATION

To the article data are driven on the increase of resource of shoulder-blades of gas-turbine options on the base of providing of the function-oriented coatings and principle of equality of resources of shoulder-blades of compressor and shoulder-blades of turbine. Methodology of synthesis of the technological providing is presented for implementation of the function-oriented coatings of shoulder-blades of compressor and turbine. The algorithm of synthesis of the function-oriented coatings of shoulder-blades of compressor and turbine is worked out.

Keywords: synthesis, technique, algorithm, resource, shoulder-blades, gas turbine plant, oil and gas industry

1. Введение

В настоящее время, для решения технологических задач в нефтегазовой промышленности широко используются газотурбинные установки (ГТУ). Они позволяют с высокой эффективностью и надежностью решать технологические вопросы добычи, переработки и транспортировки газа и нефтепродуктов. Вместе с тем, научно-технический прогресс требует дальнейшего повышения производительности, ресурса работы и надежности работы ГТУ.

Можно отметить, что ГТУ состоит из большого количества различных элементов и подсистем. При этом к основным элементам можно отнести лопатки компрессора и лопатки турбины, которые объединяются общим турбокомпрессором. В компрессоре ГТУ в основном действуют абразивно-эрозионные воздействия, а в турбине - на лопатки действуют абразивно-эрозионные, температурные, физические, химические и другие типы эксплуатационных воздействий. То есть лопатки компрессора эксплуатируются в принципиально различных условиях по сравнению с лопатками турбины. Это снижает работоспособность ГТУ из-за различного ресурса лопаток компрессора и турбины [1, 2, 3].

Кроме того, вследствие особенностей пространственной формы каждой лопатки, ее расположения в системе, кинематики движения и движения пыле-газовоздушного потока по тракту двигателя возникает неравномерный износ и разрушение поверхностей и элементов лопаток турбокомпрессора. При этом неравномерный износ происходит по поверхностям каждой лопатки и между лопатками компрессора и турбины.

Для выравнивания процессов износа элементов лопатки и обеспечения равенства ресурса лопаток компрессора и турбины необходимо обеспечивать функционально-ориентированные свойства (ФОС) лопаток турбокомпрессора [4]. В данной работе функционально-ориентированные свойства лопаток выполняются на базе функционально-ориентированных покрытий (ФОП) [5].

ФОП это специальное покрытие, в котором физико-механические свойства и/или геометрические параметры его толщины выполняются изменяющимися, в зависимости от действующих по поверхности покрытия и/или во времени неравномерных эксплуатационных функций (воздействий) [6, 7]. При этом изменяющиеся свойства покрытия могут быть следующих видов: изменяющиеся по заданному закону, с постоянно- или переменными изменяющимися свойствами, с ступенчато-изменяющимися свойствами, градиентными свойствами, в зависимости от интенсивности износа или разрушения покрытия и другие. ФОП обеспечивает для лопаток турбокомпрессора решение следующих вопросов:

- повышается ресурс лопаток;
- выполняется выравнивание износа поверхности лопатки, на которую действуют изменяющиеся эксплуатационные функции;
- обеспечивается выравнивание ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины, эксплуатирующихся в принципиально различных условиях;
- обеспечивается полная адаптация поверхности лопатки к особенностям действия эксплуатационных функций;
- повышается ремонтпригодность лопаток.

На основании этого ФОП позволяют повысить работоспособность и ремонтпригодность лопаток за счет увеличения ресурса лопаток, выравнивания ресурса поверхности лопатки и обеспечения равного ресурса лопаток компрессора и турбины в турбокомпрессоре.

Для реализации покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины необходимо технологическое обеспечение, а именно технологические процессы по нанесению ФОП. При этом для нанесения покрытия на лопатки компрессора должна быть своя структура технологического процесса, а для реализации покрытия на лопатках турбины необходима другая структура технологического процесса. Особенности структуры технологического процесса нанесения покрытия на лопатки компрессора или лопатки турбины определяются эксплуатационными особенностями работы лопаток в турбокомпрессоре.

Следует отметить, что свойства покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины имеют связи и определенные закономерности, поэтому и между структурами технологических процессов нанесения покрытий на лопатки компрессора и лопатки турбины должны действовать определенные связи. Эти особенности необходимо учитывать при синтезе структур технологического процесса по нанесению покрытий на лопатки компрессора и лопатки турбины. При этом структура технологий и их параметров должны реализовываться на основании выражений (1) или (2). Гипотетически связь свойств покрытия лопатки компрессора и лопатки турбины f можно представить с помощью следующего выражения:

$$C(\Phi ОП_1) = f[C(\Phi ОП_2)],$$

где $C(\Phi ОП_1)$ и $C(\Phi ОП_2)$ - свойства ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины, соответственно.

Целью данной работы является создание методов и алгоритмов реализации ФОП лопаток компрессора и турбины газотурбинных установок из условия равенства их ресурсов, которые работают в различных условиях эксплуатации.

В соответствии с поставленной целью в работе планируется решение следующих вопросов: предложить общие положения синтеза методов реализации ФОП лопаток компрессора и турбины из условия связей их параметров; разработать алгоритм синтеза комплексного технологического процесса реализации ФОП для лопаток компрессора; представить результаты реализации ФОП лопаток компрессора и турбины.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Общие положения

ФОС лопаток компрессора и лопаток турбины должны базироваться на комплексном подходе, связывающем их свойства на основе следующих закономерностей:

$$R_1 = R_2 \quad (1)$$

или

$$k_1 R_1 = k_2 R_2, \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – ресурс лопаток компрессора и турбины, соответственно;

k_1 и k_2 – коэффициент кратности ресурса лопаток компрессора и турбины, соответственно.

При напылении ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины, связь структур технологических процессов нанесения покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины можно представить с помощью основных положений теории графов:

$$\varphi_1 : G(X_1, A_1) \rightarrow G(X_2, A_2), \quad (3)$$

где φ_1 - функция отображения, действующая из прообраза в образ;

$G(X_1, A_1)$ - граф технологического процесса нанесения покрытия на лопатки компрессора;

$G(X_2, A_2)$ - граф технологического процесса нанесения покрытия на лопатки турбины.

В случае если абразивно-эрозионно-стойкие покрытия многослойные, выражения будут иметь следующий вид:

- при выполнении условия (1)

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \sum_{j=1}^{n_2} h_{R24j}, \quad (4)$$

- при выполнении условия (2)

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \sum_{j=1}^{n_2} h_{R24j}; \quad (5)$$

где h_{R12i} - толщина i – го слоя покрытия лопатки компрессора;

h_{R24j} - толщина j – го слоя покрытия лопат

n_1 - количество слоев покрытия лопатки компрессора;

n_2 - количество слоев покрытия лопатки турбины.

Если толщины покрытий слоев $h_{R121} = h_{R122} = \dots = h_{R12i} = \dots = h_{R12n_1} = h_{R12}$ лопатки компрессора и толщины покрытий слоев $h_{R241} = h_{R242} = \dots = h_{R24j} = \dots = h_{R24n_2} = h_{R24}$ лопатки турбины равны, то выражения (4) и (5) будут иметь следующий вид:

- при выполнении условия (1)

$$h_{R12} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \frac{n_2}{n_1} h_{R24}, \quad (6)$$

- при выполнении условия (2)

$$h_{R12} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \frac{n_2}{n_1} h_{R24}. \quad (7)$$

Методика синтез структуры технологического процесса по нанесению покрытий на лопатки турбокомпрессора должна формироваться в два этапа. Сначала, выполняется синтез структуры технологического процесса для лопаток компрессора, затем формируется структура технологического процесса по нанесению покрытий для лопаток турбины с учетом выражений (6) или (7). Выражения (6) или (7) связывают структуры технологических процессов для нанесения покрытий компрессора и для нанесения покрытий турбины.

3. Методика и алгоритм синтеза структуры комплексного технологического процесса

В целом, методика синтеза структур технологических процессов для нанесения ФОП на лопатки компрессора и лопатки турбины, имеет следующие особенности:

1. Методика содержит два структурных состава технологических процессов, а именно первый состав для формирования ФОП для лопаток компрессора, а второй состав для создания ФОП для лопаток турбины.

2. Между структурными составами технологических процессов действуют связи, которые обеспечивают свойства ФОП из условий (6) или (7).

3. Каждый структурный состав технологических процессов состоит из четырех этапов:

- 1-й этап: синтез технологии отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) лопатки компрессора (ЛК) (лопатки турбины (ЛТ)) до нанесения покрытия (НП);

- 2-й этап: синтез технологии нанесения покрытия в соответствии с рис. 1;

- 3-й этап: синтез технологии ОУО ЛК (ЛТ) после НП;

- 4-й этап процесс эксплуатации ЛК (ЛТ).

5. Каждый структурный состав технологических процессов имеет обратные связи, предназначенные для реализации ФОП. На базе этих связей выполняется анализ особенностей эксплуатации лопатки и разработка технологического обеспечения (ТО) для нанесения ФОП.

На рис. 1 представлены алгоритмы и связи между технологиями ОУО лопаток компрессора (ЛК) и лопаток турбины (ЛТ).

1. Определение входных исходных данных для напыления ФОП для лопаток компрессора. К входным исходным данным V_1 относятся: геометрические параметры

лопаток компрессора, материал лопаток компрессора, параметры качества поверхностей и функциональных элементов лопаток, методы нанесения покрытий лопаток, геометрические и физико-механические параметры покрытий и другие параметры.

2. Выполнение 1-го этапа технологического процесса: синтез технологии ОУО ЛК до НП. До НП выполняется ОУО функциональных элементов лопатки. В этом случае выполняются следующие ОУО операции: ультразвуковая поверхностно-пластическая деформация (ППД) шариками функциональных элементов лопаток, предварительная и окончательная полировка поверхностей пера лопатки, ультразвуковая очистка поверхностей лопаток. В случае восстановления работоспособности лопаток компрессора при ремонте выполняется другой комплекс различных операций с полировкой предыдущих покрытий лопаток, например методом опорного полирования [4].

3. Выполнение 2-го этапа технологического процесса нанесения ФОП. Реализация этого этапа по нанесению покрытий выполняется на основе анализа особенностей эксплуатации лопаток компрессора и разработки технологического обеспечения (ТО) нанесения ФОП₁, которые ориентируются по 4-му этапу, а именно по процессу эксплуатации лопаток компрессора (ЛК).

Для лопаток компрессора процесс нанесения покрытий выполняется в два подэтапа:

- 2.1 подэтап: синтез технологии нанесения связующего модуля покрытий (СМП);
- 2.2 подэтап: синтез технологии нанесения износостойкого модуля покрытий (ИМП).

Можно отметить, что эти подэтапы имеют заданное множество операций.

4. Выполнение 3-го этапа технологического процесса: синтез технологии ОУО ЛК после нанесения покрытия (НП). В этом случае, на этом этапе могут выполняться следующие технологические операции: предварительное и окончательное гляцевание покрытий лопаток компрессора.

5. На 4-м этапе проводится эксплуатация лопаток и проводится анализ особенностей эксплуатации покрытия лопаток компрессора. При этом по результатам анализа особенностей эксплуатации этого покрытия лопаток выполняется на 2-м этапе нанесение ФОП. То есть обратная связь позволяет реализовывать ФОП.

6. На этом алгоритм синтеза технологии нанесения ФОП₁ для лопаток компрессора завершается. Этот этап алгоритма представлен на рис. 1 прямоугольником с параметрами $END (W_1)$.

7. По результатам нанесения ФОП₁ лопаток компрессора формируется алгоритм синтеза технологии нанесения ФОП₂ и структурируются входные данные (V_2). К входным исходным данным V_2 относятся: параметры покрытий лопаток компрессора, связи между покрытиями лопаток компрессора и лопаток турбины, определяемые выражениями (6) или (7), геометрические параметры лопаток компрессора, материал лопаток компрессора, параметры качества поверхностей и функциональных элементов лопаток, методы нанесения покрытий лопаток, геометрические и физико-механические параметры покрытий и другие параметры.

8. Реализуется выполнение 1-го этапа технологического процесса для лопаток турбины (ЛТ): синтез технологии ОУО ЛТ до НП. До НП выполняется ОУО функциональных элементов лопатки. В этом случае, могут реализовываться следующие ОУО операции: ультразвуковая поверхностно-пластическая деформация (ППД) шариками функциональных элементов лопаток, предварительная и окончательная полировка по-

верхностей пера лопатки, ультразвуковая очистка поверхностей лопаток и другие операции. В случае восстановления работоспособности лопаток компрессора при ремонте выполняется другой комплекс различных операций с выполировкой предыдущих покрытий лопаток, например методом опорного полирования [4].

9. Производится выполнение 2-го этапа технологического процесса нанесения

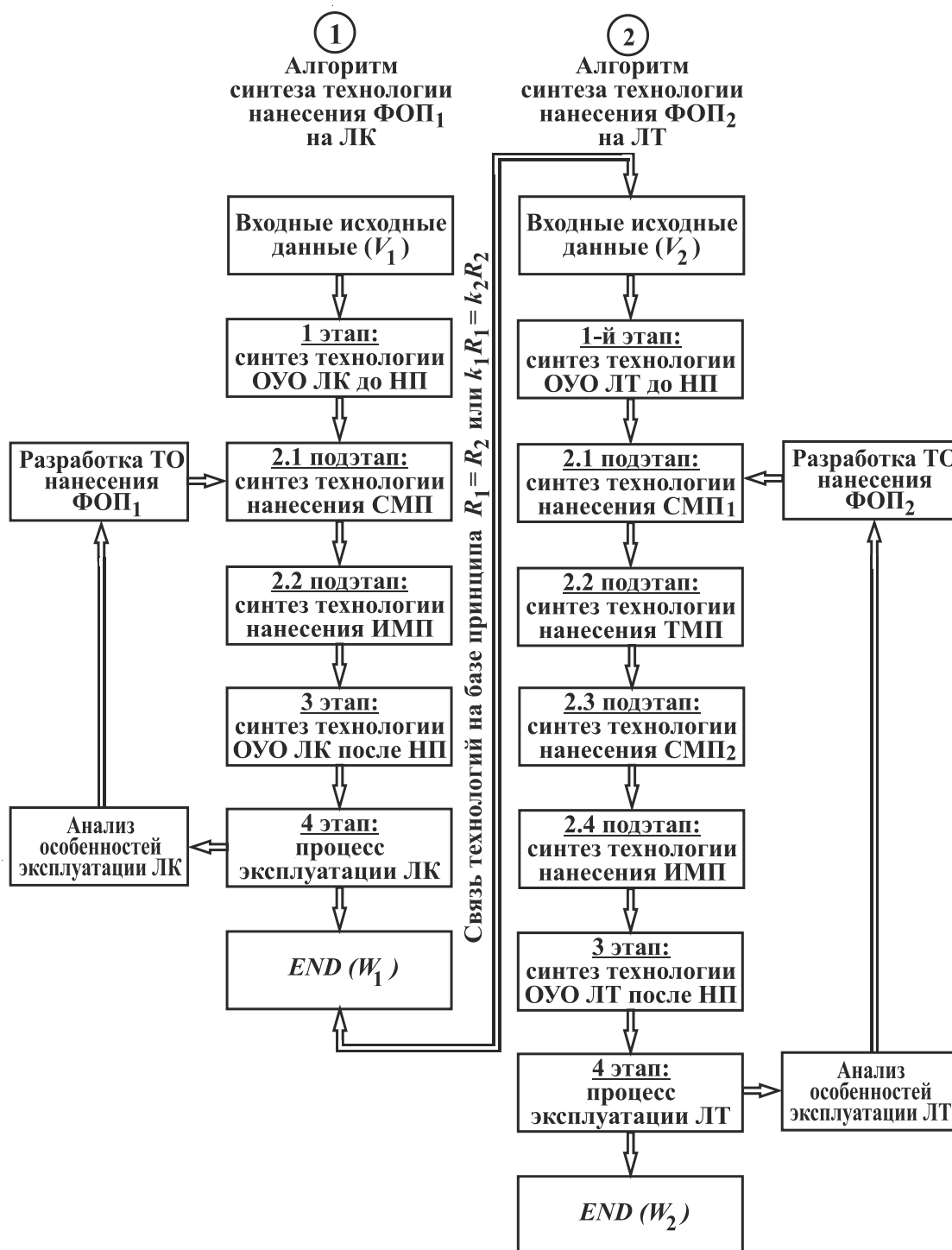


Рисунок 1. Алгоритмы и связи между технологиями ОУО лопаток компрессора (ЛК) и лопаток турбины (ЛТ)

ФОП для лопаток турбины. Реализация этого этапа, связанного с нанесением покрытий, выполняется на основе анализа особенностей эксплуатации лопаток турбины и разработки технологического обеспечения (ТО) нанесения ФОП₂. Здесь процесс нанесения покрытий базируется по 4-му этапу, а именно по процессу эксплуатации лопаток турбины (ЛТ).

Для лопаток турбины процесс нанесения покрытий выполняется в четыре подэтапа:

- 2.1 подэтап: синтез технологии нанесения первого связующего модуля покрытий (СМП₁);
- 2.2 подэтап: синтез технологии нанесения температурозащитного жаростойкого модуля покрытий (ТМП);
- 2.3 подэтап: синтез технологии нанесения второго связующего модуля покрытий (СМП₂);
- 2.4 подэтап: синтез технологии нанесения износостойкого жаростойкого модуля покрытий (ИМП).

Можно отметить, что эти подэтапы имеют заданное множество операций.

10. Выполнение 3-го этапа технологического процесса: синтез технологии ОУО ЛТ после нанесения покрытия (НП). В этом случае, на этом этапе могут выполняться следующие технологические операции: предварительное и окончательное глянцеование покрытий лопаток компрессора.

11. На 4-м этапе проводится эксплуатация лопаток и проводится анализ особенностей эксплуатации покрытия лопаток турбины. При этом по результатам анализа особенностей эксплуатации этого покрытия лопаток выполняется на 2-м этапе нанесение ФОП. То есть обратная связь позволяет реализовывать ФОП. Способ реализации ФОП представлен в работах [5, 6, 7]. При этом конфигурация пространственной границы каждого слоя покрытия определяется на базе анализа особенностей эксплуатации лопатки в ГТУ.

12. На этом алгоритм синтеза технологии нанесения ФОП₂ для лопаток турбины завершается. Этот этап алгоритма представлен на рис. 1 прямоугольником с параметрами *END* (W_2).

Представленный алгоритм и приведенные связи между двумя технологиями ОУО лопаток турбокомпрессора позволяет наносить ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины в соответствии с выражениями (6) или (7). При этом обеспечивается выполнение условий принципов (1) или (2).

4. Основные результаты выполнения ФОП лопаток компрессора и турбины

В целом, ФОП позволяет полностью адаптировать свойства лопатки (толщина покрытия и его топографические параметры на поверхности) при нанесении покрытия в зависимости от действия эксплуатационных функций, а именно абразивно-эрозионного воздействия. Это позволяет решать вопросы полного использования покрытия лопатки из условия его постоянного сохранения на поверхностях лопатки. А также при длительной эксплуатации лопатки создаются условия единовременного разрушения данного покрытия в заданный период времени в условиях действия неравномерного износа. В этом случае, реализуется исключение износа и разрушения тела лопатки до полного единовременного износа всего покрытия на поверхностях и элементах лопатки. Кроме того, ФОП позволяет повысить общий ресурс лопаток, увеличить их межремонтный ресурс и количество восстановлений лопаток при ремонтах ГТУ.

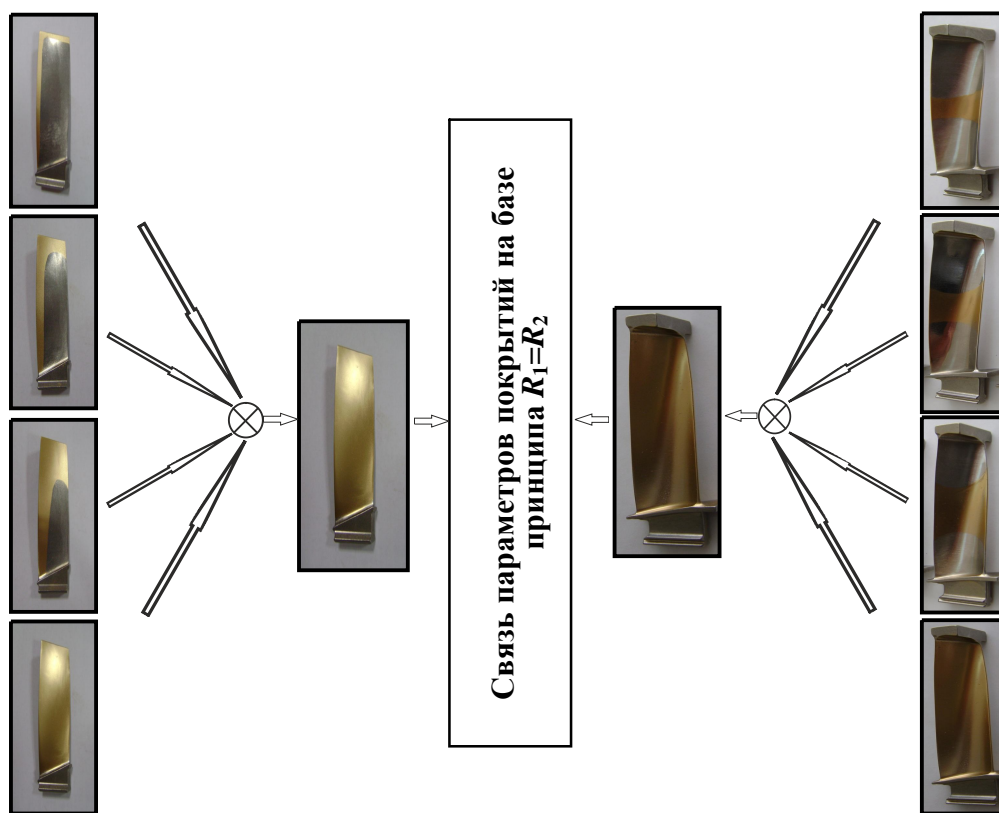


Рисунок 2. Структурная схема синтеза ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины на базе принципа равенства их ресурсов

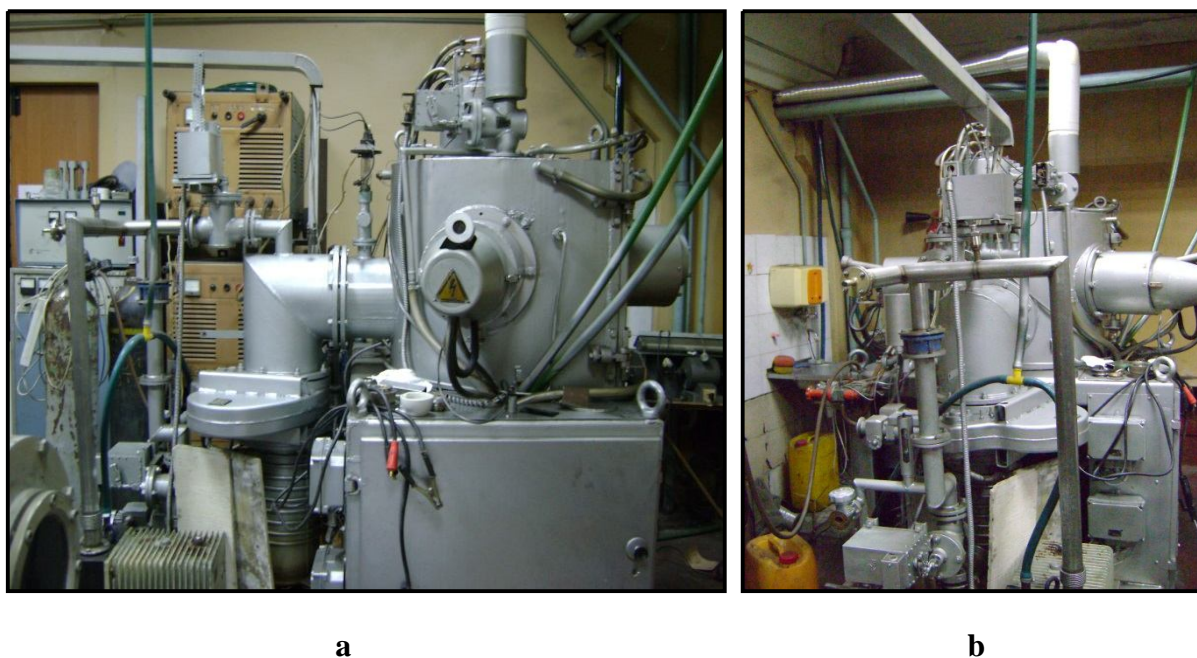


Рисунок 3. Общий вид установки ННВ 6.6-И1

Отметим, что главным при обеспечении ФОС покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины является установление свойств этих лопаток из условия равенства $R_1=R_2$ или кратности $k_1 R_1=k_2 R_2$ их ресурсов

На рис. 2 представлена структурная схема синтеза ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины на базе принципа равенства их ресурсов. Для обеспечения этих параметров, ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины должны формироваться на основании связей параметров покрытий из условий (6) или (7). Это обусловлено тем, что лопатки компрессора и лопатки турбины эксплуатируются в принципиально различных условиях эксплуатации. Лопатки компрессора работают в условиях преобладания абразивно-коррозионно-эрозионных разрушения, а лопатки турбины при комплексном действии абразивно-коррозионно-эрозионного разрушения, температурных, физических и химических воздействий.

Технологический процесс напыления ФОП на лопатки компрессора и турбины выполнялся на установке ННВ 6.6-И1. Для напыления покрытий на лопатки использовались нитрид титановые покрытия. На рис. 3 представлен общий вид установки ННВ 6.6-И1. Здесь показано следующее: на рис. 3, а – вид сбоку, на рис. 3, б – вид сзади. Для повышения производительности напыления ФОП использовалась специальная технологическая оснастка, имеющая высокую концентрацию рабочих позиций установки лопаток для напыления. Общее количество одновременно напыляемых лопаток определяется следующим выражением:

$$u = \prod_{k=1}^p u_k, \quad (8)$$

где u – общее количество одновременно напыляемых лопаток (концентрация рабочих позиций);

u_k – количество рабочих позиций k -го класса;

p – общее количество классов подсистем технологической оснастки.

Учитывая выражение (8) цикловая производительность установки для напыления ФОП определяется по следующей формуле:

$$P_{Ц} = \frac{\prod_{k=1}^p u_k}{\sum_{i=1}^n [t_{oi} + (\sum_{j=1}^m t_{Bj})_i]}; \quad (9)$$

где $P_{Ц}$ – цикловая производительность установки;

n – количество слоев покрытия лопаток турбокомпрессора;

m – число составляющих вспомогательного времени при нанесении каждого слоя ФОП;

t_{oi} – длительность основного времени напыления i -го слоя покрытия

t_{Bj} – j -я составляющая вспомогательного времени для напыления i -го слоя покрытия.

5. Заключение

Таким образом, в представленной работе разработаны общие положения обеспечения ФОС лопаток компрессора и турбины на базе ФОП, работающих в принципиально различных условиях эксплуатации. Для реализации ФОП лопаток разработаны методы и алгоритм реализации комплексного технологического процесса. При этом уста-

новлены связи параметров покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины из условий равенства или кратности их ресурсов. В работе выполнена конкретная реализация технологического процесса напыления многослойного ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины. Приведены выражения для определения цикловой производительности выполнения ФОП лопаток турбокомпрессора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Авиаинформ [Текст] / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2018. – Вып. № 12 (177). – 153 с.
2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учебное пособие. / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Полетаев, В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В. А. Полетаев. – Москва: Машиностроение, 2006. – 256 с.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Михайлов, Д. А. Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий / Д. А. Михайлов [и др.] // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – Вип. 1 (47). – С. 213 - 224.
6. Пичко, А. П. Особенности обеспечения свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинной установки на базе функционально-ориентированных покрытий и равенства их ресурсов / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 1 (64). – С. 68 - 77.
7. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). – С. 132 - 139.

Поступила в редколлегию 20.02.2019 г.