

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

<sup>1</sup>А. П. Пичко, аспирант, <sup>2</sup>Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доцент,<sup>1</sup>А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, профессор<sup>1</sup>ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР<sup>2</sup>ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНРТел.: +38 (071) 3060879; E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА И ТУРБИНЫ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

*В представленной работе рассмотрены особенности синтеза структуры технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными свойствами. Представлена схема связей свойств лопаток компрессора и турбины. Представлены варианты покрытий для реализации функционально-ориентированных свойств лопаток. А также приведена классификация состава покрытий в зависимости от вида слоев и их назначения. Показаны особенности построения структуры технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток с функционально-ориентированными свойствами. Приведены конкретные структурные варианты технологических процессов обеспечения функционально-ориентированных свойств.*

**Ключевые слова:** процессы, технология, комплексный подход, лопатки, функционально-ориентированные покрытия.

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

## TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF THE PROCESS-IN-FINISHING AND STRENGTHENING TREATMENT OF COMPRESSOR AND TURBINE BLADES WITH FUNCTIONAL-ORIENTED COATINGS

*In the present paper, the features of the synthesis of the structure of technological processes of finishing and hardening treatment of compressor blades and a turbine with function-oriented properties are considered. A diagram of the relations of the properties of the compressor and turbine blades is presented. The variants of coatings for the implementation of functionally oriented properties of the blades are presented. A classification of the coating composition depending on the type of layers and their purpose is also given. The features of the construction of the structure of technological processes of finishing-strengthening treatment of blades with function-oriented properties are shown. Specific structural variants of technological processes of providing function-oriented coatings are given*

**Keywords:** processes, technology, integrated approach, blades, function-oriented coatings.

### 1. Введение

В настоящее время в нефтегазовой промышленности широко используются газотурбинные установки (ГТУ) для решения заданных технологических задач. ГТУ представляет собой сложную техническую систему, состоящую из целого комплекса подсистем и элементов. К основным подсистемам ГТУ относятся компрессор и турбина, имеющие целый комплекс лопаток различного назначения. Выполненные ранее исследования [1, 2, 3] позволили установить, что лопатки компрессора и лопатки турбины эксплуатируются в различных условиях вследствие действия абразивных, коррозионных, химических, физических, температурных и других воздействий. Это приводит к неравномерным разрушениям лопаток компрессора и лопаток турбины, что снижает ресурс ГТУ.

Для повышения ресурса ГТУ применяются функционально-ориентированные покрытия (ФОП) лопаток, и реализуется с помощью этих покрытий выравнивание их

ресурса в компрессоре и турбине [4, 5, 6] при действии принципиально различных условий их эксплуатации. Для реализации ФОП лопаток необходима разработка специальных технологий, которые позволяют, с одной стороны, повысить ресурс лопаток, и с другой стороны, выровнять ресурс лопаток компрессора и лопаток турбины, что в целом, повышает ресурс ГТУ технологическими методами.

Целью данной работы является повышение ресурса ГТУ на основе применения ФОП и выравнивания ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины путем синтеза структуры технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с ФОП.

Для достижения этой цели в данной работе планируется выполнение следующих задач: предложить общую схему связей свойств лопаток для последующей разработки технологического обеспечения процессов реализации ФОП и выравнивания их ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины; разработать структурные варианты покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины для формирования функционально-ориентированных свойств; выполнить синтез структуры комплексного технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток с ФОП.

Эти задачи решаются в данной работе.

## **2. Общие особенности и схема связей свойств лопаток компрессора и турбины с ФОП**

В данной работе предусматривается выполнение синтеза структуры комплексного технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями (ФОП). Здесь, под понятием комплексный технологический процесс понимается одновременный (последовательный или параллельный) синтез структуры технологического процесса для лопаток компрессора и лопаток турбины с установлением связей между их параметрами. При этом синтез структуры технологических процессов ОУО с ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины предусматривается выполнять на основе установления обратных связей с особенностями процесса их эксплуатации.

В данной работе предусматривается выполнение комплексного синтеза технологии, состоящей из двух потоков технологических процессов ОУО с ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины. Этот комплексный технологический процесс должен реализовываться на базе принципа предельного или заданного, одинакового или кратного ресурса групп лопаток компрессора и лопаток турбины газотурбинной установки (ГТУ). Данный принцип обеспечивает одновременное полное разрушение защитного ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины. А это позволяет решать вопрос повышения полного потенциала ресурса для всех групп лопаток турбокомпрессора. При этом на базе этих принципов возможно дальнейшее одновременное восстановление групп лопаток компрессора и групп лопаток турбины при последующих капитальных ремонтах ГТУ с нанесением одновременно на эти группы лопаток ФОП. Все это дает возможность решать вопросы обеспечения предельного эксплуатационного потенциала ГТУ [7, 8, 9].

Можно отметить, что на базе структурной схемы общего подхода выполняется анализ и синтез структурных вариантов технологических процессов обработки лопаток компрессора и лопаток турбины при их эксплуатационных преобразованиях в ГТУ.

Любой комплексный технологический процесс ОУО лопаток всегда многовариантен. При этом необходимые свойства лопаток ГТУ можно обеспечить с использованием технологических процессов с различными их структурными вариантами. В этом

случае, для решения различных практических задач необходимо проводить решения вопросов отыскания технологических процессов с рациональной или доминирующей структурой. На рис. 1 представлена схема связей и закономерностей свойств лопаток компрессора и турбины турбокомпрессора ГТУ, которая поясняет многовариантность процесса синтеза структуры комплексного технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора.

Можно отметить, что согласно рис. 1, процесс проектирования структуры технологического процесса с ФОП базируется на множестве  $1, 2, 3, \dots, x_1$  вариантов реализации покрытий для лопаток компрессора и множестве  $1, 2, 3, \dots, x_2$  вариантов реализации покрытий лопаток турбины. Причем выбор структурных вариантов должен базироваться на связях и закономерностях свойств

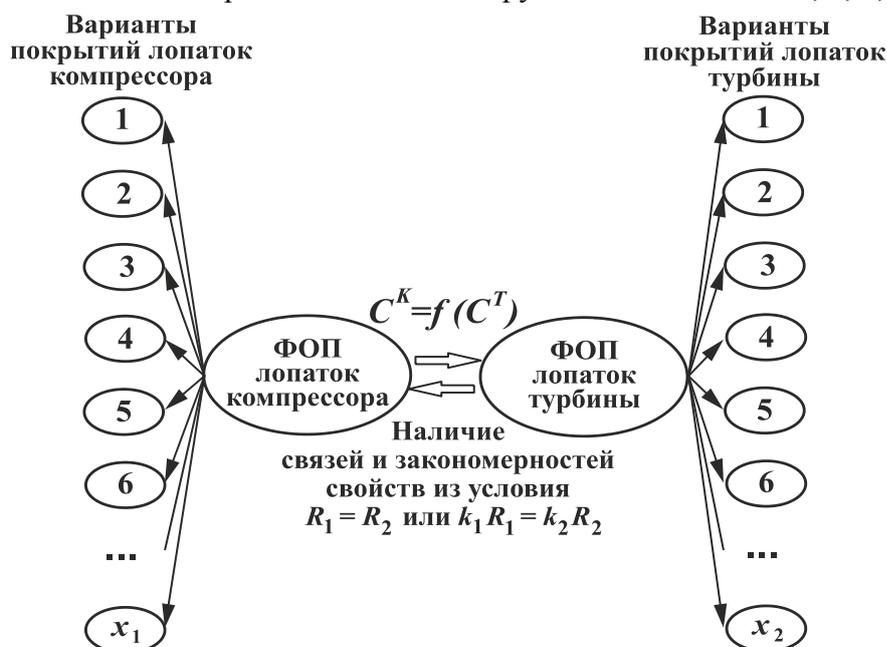


Рисунок 1. Схема связей и закономерностей свойств лопаток компрессора и турбины турбокомпрессора ГТУ

лопаток компрессора и множестве  $1, 2, 3, \dots, x_2$  вариантов реализации покрытий лопаток турбины. Причем выбор структурных вариантов должен базироваться на связях и закономерностях свойств

$C^K = f(C^T)$ , а именно ресурсы их должны быть равны или кратны [10].

Следует отметить, что проектирование вариантов ФОП лопаток компрессора и турбины, работающих

в различных условиях эксплуатации при действии различных эксплуатационных функций, является очень сложным процессом. Это обусловлено, прежде всего тем, что в компрессоре выполняются одни условия эксплуатации лопаток, а лопатки турбины эксплуатируются совершенно в других условиях при действии других эксплуатационных функций. При этом за счет различных покрытий необходимо обеспечить равный или кратный ресурс лопаток компрессора и турбины. Из этих соображений должны проектироваться структурные варианты технологических процессов ОУО и реализации покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины.

### 3. Структурные варианты покрытий лопаток компрессора и турбины

Существует большое множество решений обеспечения различных вариантов ФОП покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины. В качестве примера на рис. 2 представлены возможные варианты покрытий лопаток компрессора.

На рис. 2 показаны варианты покрытий лопаток компрессора: на рис. 2, а – гомогенное однослойное абразивно-эрозионно-стойкое покрытие, состоящее из модуля  $M_{R\ i1}$ ; на рис. 2, б – двух модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{C\ i1}$  и гомогенного однослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{R\ i2}$ ; на рис. 2, в – многослойное абразивно-эрозионно-стойкое покрытие, состоящее из модуля  $M_{R\ i1}$ ; на

рис. 2, г – двухмодульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{C\ i1}$  и многослойного абразиво-эрозионно-стойкого модуля  $M_{R\ i2}$ . На основе этих вариантов покрытий можно формировать четыре варианта ФОП. А также возможны и другие перспективные варианты покрытий лопаток компрессора.

Можно отметить, что главной эксплуатационной функцией, действующей на лопатки компрессора является абразиво-эрозионный (коррозионный) износ их поверхностей. При этом температурные воздействия на лопатки компрессора незначительны.

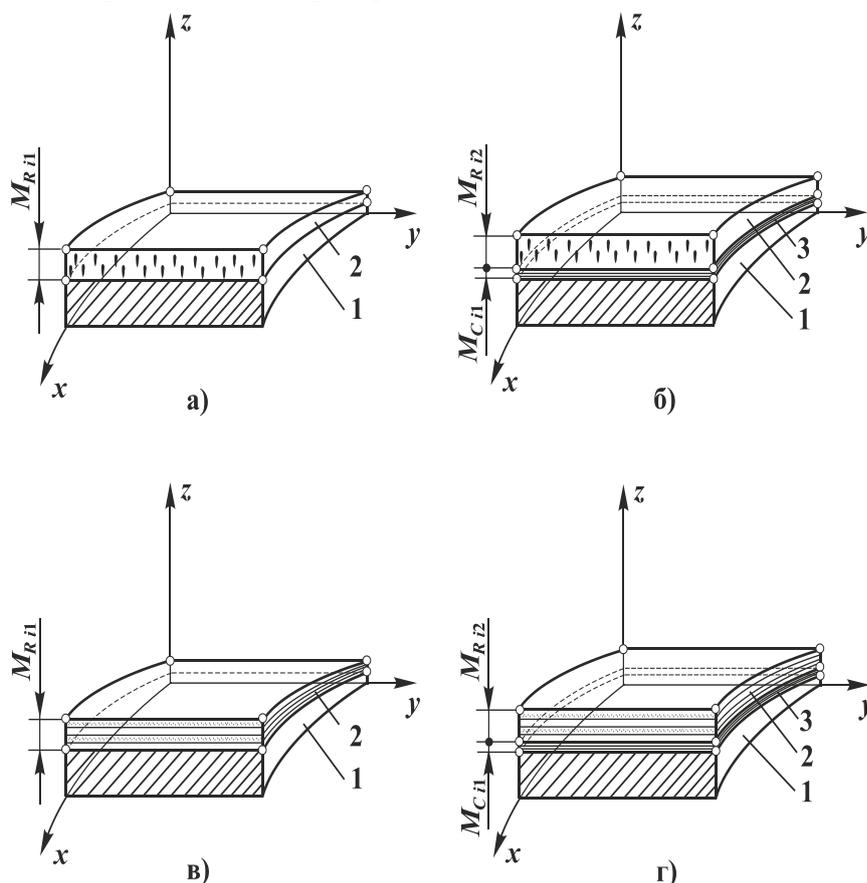


Рисунок 2. Варианты покрытий лопаток компрессора:  
 а – гомогенное однослойное абразиво-эрозионно-стойкое покрытие, состоящее из модуля  $M_{R\ i1}$ ;  
 б – двух модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{C\ i1}$  и гомогенного однослойного абразиво-эрозионно-стойкого модуля  $M_{R\ i2}$ ;  
 в – многослойное абразиво-эрозионно-стойкое покрытие, состоящее из модуля  $M_{R\ i1}$ ;  
 г - двух модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{C\ i1}$  и многослойного абразиво-эрозионно-стойкого модуля  $M_{R\ i2}$

и снижали бы температуру эксплуатационных воздействий.

На рис. 3 представлены варианты покрытий лопаток турбины: на рис. 3, а – двух модульное покрытие, состоящее из гомогенного однослойного температуро-защитного жаростойкого модуля  $M_{T\ i1}$  и гомогенного однослойного абразиво-эрозионно-стойкого

Поэтому для лопаток компрессора 1 (рис. 2) необходимы покрытия эрозионно - коррозионно - стойкие 2. Это могут быть однослойные гомогенные или многослойные покрытия. Причем они могут наноситься непосредственно на материал лопатки 1 или посредством связующего модуля покрытий 3, который решает проблему адгезионной их прочности.

В качестве другого примера на рис. 3 представлены возможные варианты покрытий лопаток турбины. Лопатки турбины эксплуатируются совершенно других условиях. При этом в зоне турбины действуют температурные воздействия, которые достигают 1400 ... 1800 °С. Поэтому здесь, должны быть специальные покрытия, которые бы защищали бы основной материал лопаток от действия температуры

модуля  $M_{Ri2}$ ; на рис. 3, б – четырех модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{Ci1}$ , гомогенного однослойного температуро-защитного жаростойкого модуля

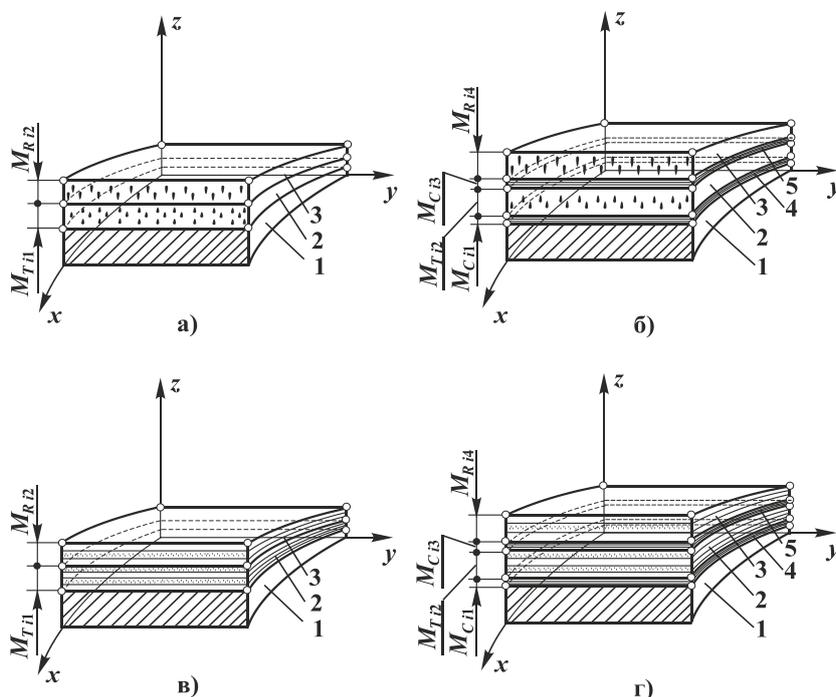


Рисунок 3. Варианты покрытий лопаток турбины:

а – двух модульное покрытие, состоящее из гомогенного однослойного температуро-защитного жаростойкого модуля  $M_{Ti1}$  и гомогенного однослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{Ri2}$ ; б – двухмодульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{Ci1}$ , гомогенного однослойного температуро-защитного жаростойкого модуля  $M_{Ti1}$ , связующего модуля  $M_{Ci3}$  и гомогенного однослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{Ri4}$ ; в – двух модульное покрытие, состоящее из многослойного температуро-защитного жаростойкого модуля  $M_{Ti1}$  и многослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{Ri2}$ ; г - четырех модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{Ci1}$ , многослойного температуро-защитного жаростойкого модуля  $M_{Ti2}$ , связующего модуля  $M_{Ci3}$  и многослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{Ri4}$

$M_{Ti1}$ , связующего модуля  $M_{Ci3}$  и гомогенного однослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{Ri4}$ ; на рис. 3, в – двух модульное покрытие, состоящее из многослойного температуро-защитного жаростойкого модуля  $M_{Ti1}$  и многослойного абразивно - эрозионно-стойкого модуля  $M_{Ri2}$ ; на рис. 3, г - четырех модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{Ci1}$ , многослойного температуро-защитного жаростойкого модуля  $M_{Ti1}$ , связующего модуля  $M_{Ci3}$  и многослойного абразивно - эрозионно-стойкого модуля  $M_{Ri4}$ . На рис. 3, а и рис. 3, б позиции обозначают следующее: 1 – материал лопатки турбины, 2 – температуро-защитное жаростойкое покрытие, 3 – абразивно - эрозионно-стойкое покрытие. При этом на рис. 3, а покрытия 2 и 3 гомогенные однослойные, а на рис. 3, в покрытия 2 и 3 многослойные. На рис. 3, б и рис. 3, г позиции обозначают сле-

дующее: 1 – материал лопатки турбины, 2 – температуро-защитное жаростойкое покрытие, 3 – абразивно-эрозионно-стойкое покрытие, 4 – связующее покрытие, связывающее основной материал лопатки с температуро-защитным жаростойким покрытием, 5 – связующее покрытие, связывающее покрытия 2 и 3. При этом на рис. 3, б покрытия 2 и 3 гомогенные однослойные, а на рис. 3, г покрытия 2 и 3 многослойные.

Можно отметить, что в зоне турбины действуют комплексные эксплуатационные функции, которые обуславливаются абразивно-эрозионными и температурными

воздействиями. Поэтому для обеспечения работоспособности лопаток турбины могут применяться различные варианты покрытий, некоторые варианты которых представлены на рис. 3.

На рис. 4 показан состав покрытий в зависимости от вида слоев и их назначения. Эти покрытия могут применяться как для лопаток компрессора, так и для лопаток тур-

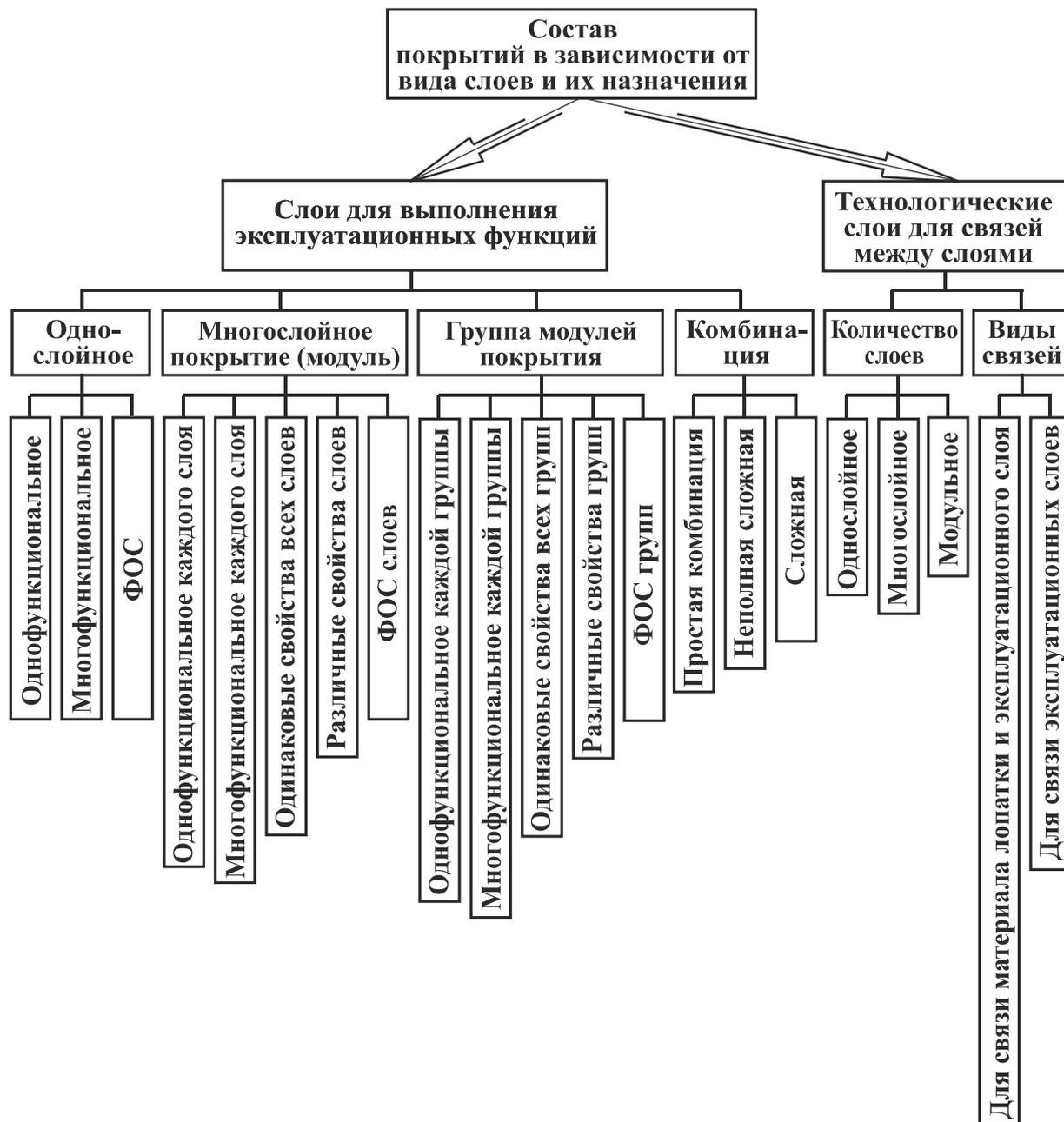


Рисунок 4. Состав покрытий в зависимости от вида слоев и их назначения

бины. При этом состав слоев покрытий в зависимости от вида слоев и их назначения имеет следующую структуру:

- слои для выполнения эксплуатационных функций;

- технологические слои для обеспечения связей между эксплуатационными слоями.

На базе представленной классификации покрытий рис. 4 формируются необходимые ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ.

В качестве примера на рис. 5 представлены особенности синтеза вариантов ФОП лопаток турбины в соответствии заданным вариантом ФОП лопатки турбины в зависимости от закономерностей свойств

этих покрытий. Здесь показано, что на базе одного варианта ФОП лопаток компрессора, имеющего модуль связующих покрытий и модуль абразиво-эрозионно-стойкого покрытия, возможно создание целого множества 1, 2, 3, ...,  $x_2$  различных вариантов покрытий лопаток компрессора. При этом покрытия лопаток турбины в зависимости от действия эксплуатационных функций, особенностей охлаждения и материала лопаток могут быть двухмодульные и многомодульные (рис. 5).

Следует отметить, что при синтезе вариантов ФОП (рис. 5) необходимо определять соответствия и связи параметров между покрытиями лопатки компрессора

и лопатки турбины. В качестве примера на рис. 6 приведена схема по определению соответствия и связей параметров между покрытиями лопатки компрессора и лопатки турбины с одинаковыми модулями покрытий

Здесь, можно отметить, что определение соответствия модулей покрытий 2 лопаток компрессора 1 и лопаток турбины 1 (рис. 6)  $M_{R22} = f(M_{R12})$  можно выполнять в соответствии с выражением (2.10) и (2.11). Также заметим, что в данном случае для ло-

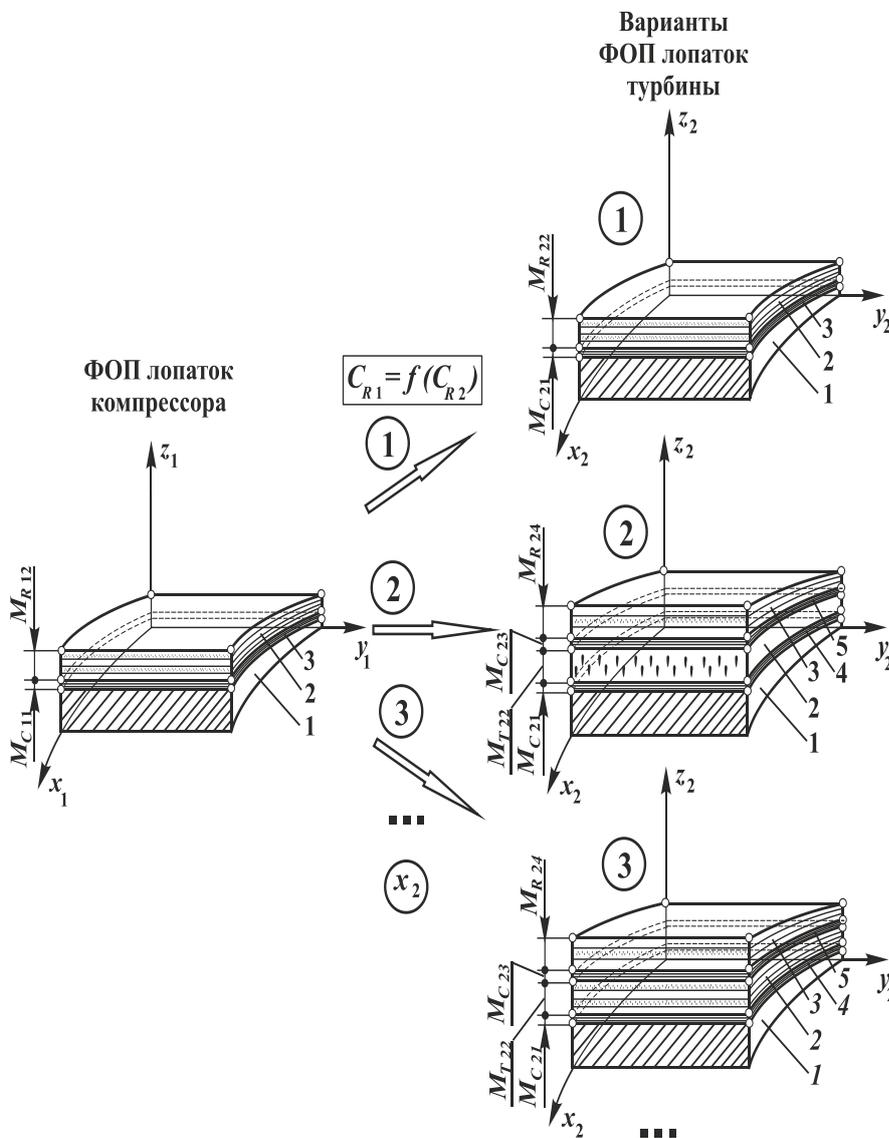


Рисунок 5. Особенности синтеза вариантов ФОП<sub>2</sub> лопаток турбины в соответствии заданным вариантом ФОП<sub>1</sub> лопатки турбины в зависимости от закономерностей свойств этих покрытий

паток компрессора и лопаток турбины применяется однофункциональные покрытия для лопаток компрессора и лопаток турбины. Между материалом лопатки 1 и функциональным покрытием 2 наносится связующее покрытие 3 (рис. 6). Кроме того, в данном

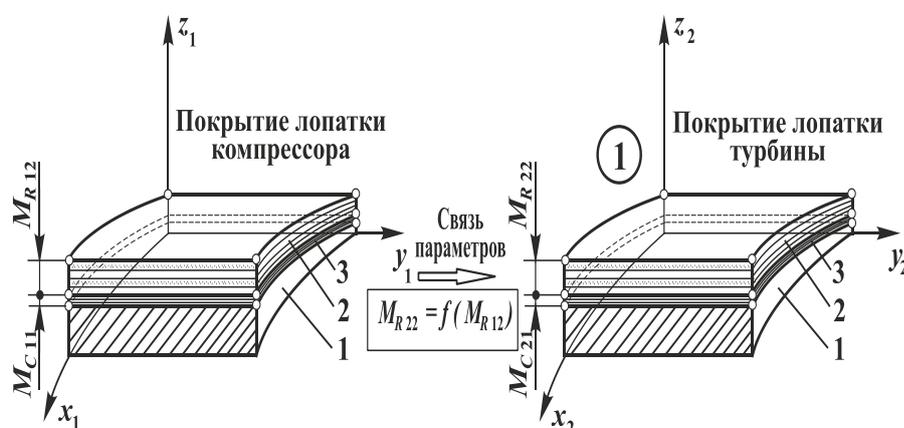


Рисунок 6. Определение соответствия и связей параметров между покрытиями лопатки компрессора и лопатки турбины с одинаковыми модулями покрытий

случае, в качестве лопаток турбины могут использоваться охлаждаемые лопатки. Поэтому температуро-защитное покрытие отсутствует.

В качестве другого примера на рис. 7 приведена схема по определению соответствия и связей параметров между покрытиями лопатки компрессора и лопатки турбины с различными модулями покрытий. Приведенная схема применяется для неохлаждаемых лопаток турбины и дополнительно используется температуро-защитное покрытие 3 (рис. 7). В этом случае для лопаток компрессора 1 используется двух модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{C11}$  и многослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{R12}$ . Для лопаток турбины применяется четырех модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{C21}$ , многослойного температуро-

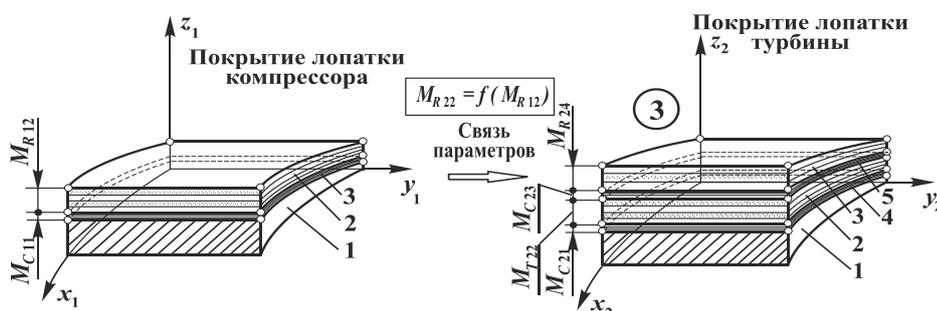


Рисунок 7. Определение соответствия и связей параметров между покрытиями лопатки компрессора и лопатки турбины с различными модулями покрытий

защитного жаростойкого модуля  $M_{T22}$ , связующего модуля  $M_{C23}$  и многослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{R24}$ .

Таким образом, приведенные в данном параграфе данные позволяют определять начальные параметры для проектирования структуры ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОП.

#### 4. Особенности синтеза структуры комплексного технологического процесса ОУО

Каждый технологический процесс имеет заданную структуру операций или этапов. Можно отметить, что структура это совокупность элементов и отношений между ними [4]. В технологическом процессе в качестве элементов выступают операции или

эрозионно-стойкого модуля  $M_{R12}$ . Для лопаток турбины применяется четырех модульное покрытие, состоящее из связующего модуля  $M_{C21}$ , многослойного температуро-

защитного жаростойкого модуля  $M_{T22}$ , связующего модуля  $M_{C23}$  и многослойного абразивно-эрозионно-стойкого модуля  $M_{R24}$ .

этапы технологических процессов. В качестве отношений структуры технологического процесса могут быть определенные связи и закономерности между операциями или этапами технологического процесса. Структуру комплексного технологического процесса ОУО новых лопаток компрессора и турбины с ФОП можно представить системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Str\ TП_1 &= \{X_1, A_1\}; \\ Str\ TП_2 &= \{X_2, A_2\}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $Str\ TП_j$  - структура  $j$ -го технологического процесса ( $j = 1, 2$ ; 1 - технологический процесс ОУО лопаток компрессора, 2 – технологический процесс ОУО лопаток турбины);

$X_j$  – этапы  $j$ -го технологического процесса;

$A_j$  – связи между этапами  $j$ -го технологического процесса.

Можно отметить, что каждый технологический процесс ОУО для новых лопаток компрессора или турбины с ФОП обычно формируется из трех этапов:

- 1-й этап: предварительной обработки до нанесения покрытия,
- 2-й этап: нанесения ФОП<sub>*j*</sub>,
- 3-й этап: завершающей обработки после нанесения покрытия.

На рис. 8 показаны особенности построения структуры технологического процесса ОУО для ФОП<sub>1</sub> лопаток компрессора и ОУО для ФОП<sub>2</sub> лопаток турбины при нанесении покрытий на новые лопатки.

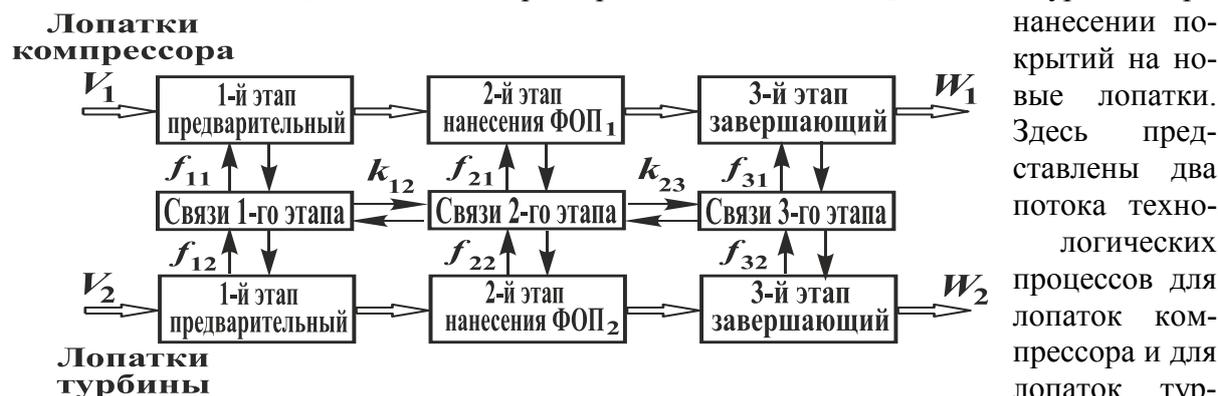


Рисунок 8. Особенности построения структуры технологического процесса ОУО для ФОП<sub>1</sub> лопаток компрессора и ОУО для ФОП<sub>2</sub> лопаток турбины при нанесении покрытий на новые лопатки

Между последовательными этапами технологических процессов для лопаток компрессора и для лопаток турбины. Здесь представлены два потока технологических процессов для лопаток компрессора и для лопаток турбины. Между последовательными этапами технологических процессов действуют определенные связи  $k_{st}$ , а также между параллельными этапами технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС действуют свои связи  $f_{jp}$ .

В выражении (1) составляющие определяются следующими множествами:

$$\left. \begin{aligned} Str\ TП_1 &= \{(X_{11}, A_{11}), (X_{12}, A_{12}), (X_{13}, A_{13})\}; \\ Str\ TП_2 &= \{(X_{21}, A_{21}), (X_{22}, A_{22}), (X_{23}, A_{23})\}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $(X_{jp}, A_{jp})$  –  $p$ -й кортеж составляющих  $j$ -го технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора.

Анализируя систему уравнений (2) для их составляющих можно записать следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} X_{jp} &= \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_z\}; \\ A_{jp} &= \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_y\}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $x_z$  и  $a_y$  - z-я операция и y-я связь в j-м технологическом процессе ОУО лопаток турбокомпрессора с ФОП.

Можно заметить, что структура 1-го этапа комплексного технологического процесса ОУО новых лопаток компрессора и лопаток турбины представлена на рис. 9. Здесь, показаны два потока технологических процессов для лопаток компрессора и лопаток турбины. На рис. 9 показано:  $V_{11}$  и  $W_{11}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопаток компрессора, соответственно;  $V_{12}$  и  $W_{12}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопаток турбины, соответственно. Меж-

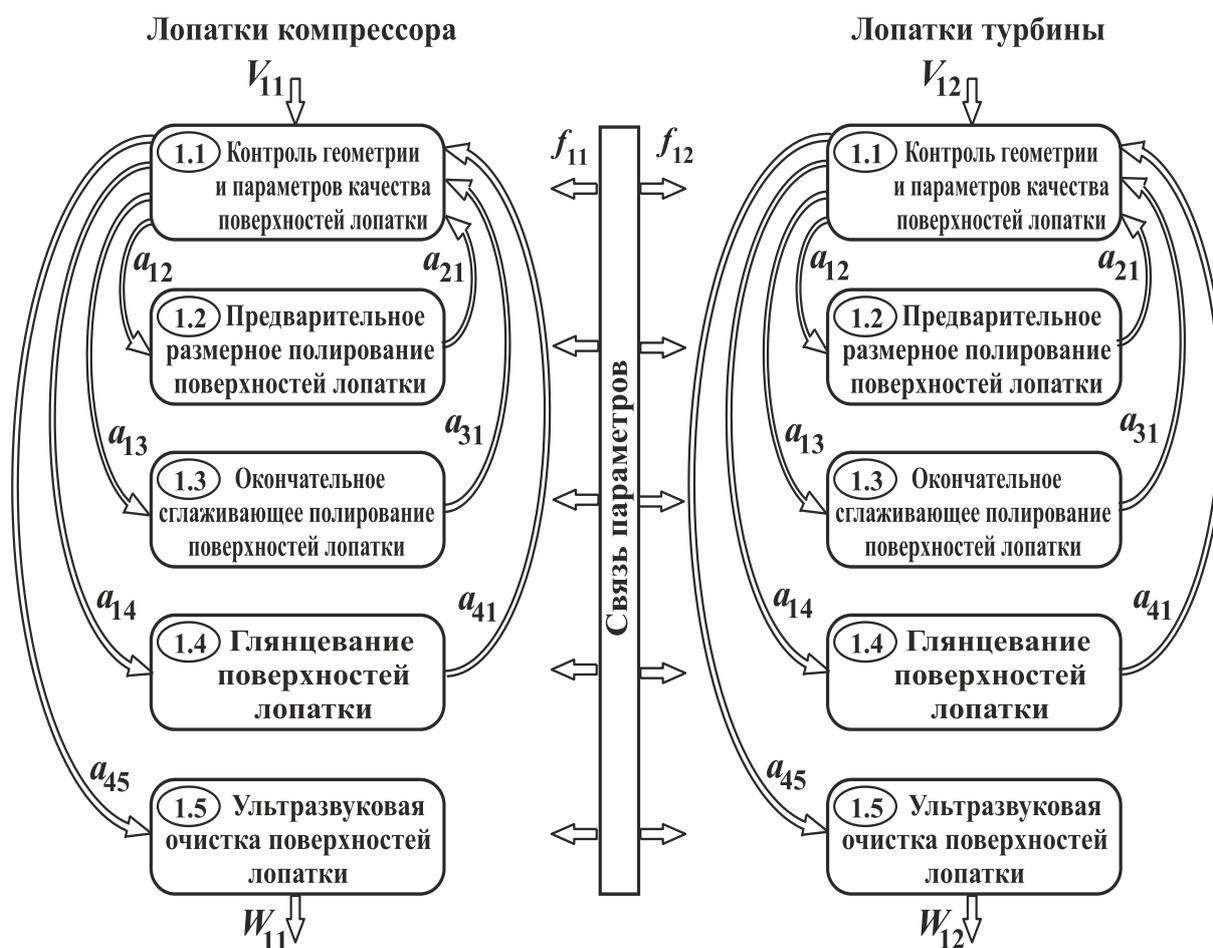


Рисунок 9. Структура технологических процессов 1-го этапа технологического процесса ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом связей параметров качества их поверхностей для новых лопаток

ду структурами технологических процессов действуют связи  $f_{11}$  и  $f_{12}$ .

Структура 1-го этапа технологических процесса строится на пяти операциях:

- 1.1. Контроль геометрии и параметров качества поверхностей лопатки;
- 1.2. Предварительное размерное полирование поверхностей лопатки.
- 1.3. Окончательное сглаживающее полирование поверхностей лопатки.
- 1.4. Глянцевание поверхностей лопатки.

### 1.5. Ультразвуковая очистка поверхностей лопатки.

При этом связи между операциями имеют итерационно-рекуррентную структуру (рис. 9). При этом между структурами технологических процессов действуют другие связи. Это значит, что параметры качества операций каждого технологического процесса зависят между собой.

В соответствии с рис. 8 далее следует 2-й этап технологического процесса ОУО для ФОП<sub>1</sub> лопаток компрессора и ОУО для ФОП<sub>2</sub> лопаток турбины при нанесении покрытий на новые лопатки.

На рис. 10 представлена структура технологических процессов 2-го этапа технологического процесса напыления покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом связей параметров качества их покрытий для новых лопаток турбокомпрессора в соответствии с покрытием рис. 6. В этом случае ФОП<sub>1</sub> на лопатки компрессора наносится в соответствии с левой линией алгоритма технологического процесса, а ФОП<sub>2</sub> на лопатки турбины наносится в соответствии с правой линией алгоритма технологического процесса. Можно отметить, что структура этих покрытий, а именно лопаток компрессора и лопаток турбины, строится идентично. При этом состав покрытий может быть различным для обеспечения реализации равенства их ресурсов при эксплуатации в условиях действия различных функций. Также следует отметить, что покрытия лопаток турбины, представленные на рис. 6, могут обычно применяться для охлаждаемых лопаток. Кроме того, в соответствии с рис. 10, между алгоритмами технологических процессов лопаток компрессора и лопаток турбины действуют связи  $f_{21}$  и  $f_{22}$ . На рис. 10 показано:  $V_{21}$  и  $W_{21}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопаток компрессора, соответственно;  $V_{22}$  и  $W_{22}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопаток турбины, соответственно.

Можно отметить, что технологические процессы нанесения ФОП предусматривается выполнять на вакуумной ионно-плазменной установке в соответствии с разработанным способом, который будет представлен в следующем разделе диссертационной работы. При этом структура этих технологических процессов многовариантна, она определяется связями  $a_{st}$ , а также особенностями итерационно-рекуррентных отношений, на базе которых формируется прогрев лопаток и количество различных слоев покрытия.

Структуры технологических процессов напыления ФОП<sub>*i*</sub> имеют следующие операции:

- 2.1. Загрузка лопаток в вакуумную камеру.
- 2.2. Очистка лопаток в тлеющем разряде.
- 2.3. насыщение поверхностного слоя газами (азотирование).
- 2.4. Ионная бомбардировка поверхностей лопаток.
- 2.5. Прогрев лопаток.
- 2.6. Напыление  $i_j$ -го слоя модуля  $M_{Cj1}$  связующих покрытий со слоями  $i_j = 1, 2, 3, \dots, I_j$ .
- 2.7. Напыление  $m_j$ -го слоя модуля  $M_{Rj2}$  абразиво-эрозионностойкого многослойного (АЭС) или абразиво-эрозионно-жаростойкого (АЭЖС) многослойного покрытия со слоями  $m_j = 1, 2, 3, \dots, M_j$ .
- 2.8. Охлаждение лопаток.
- 2.9. Разгрузка лопаток из вакуумной камеры.

В качестве другого варианта напыления ФОП на лопатки турбокомпрессора на рис. 11 представлена еще одна структура технологического процесса.

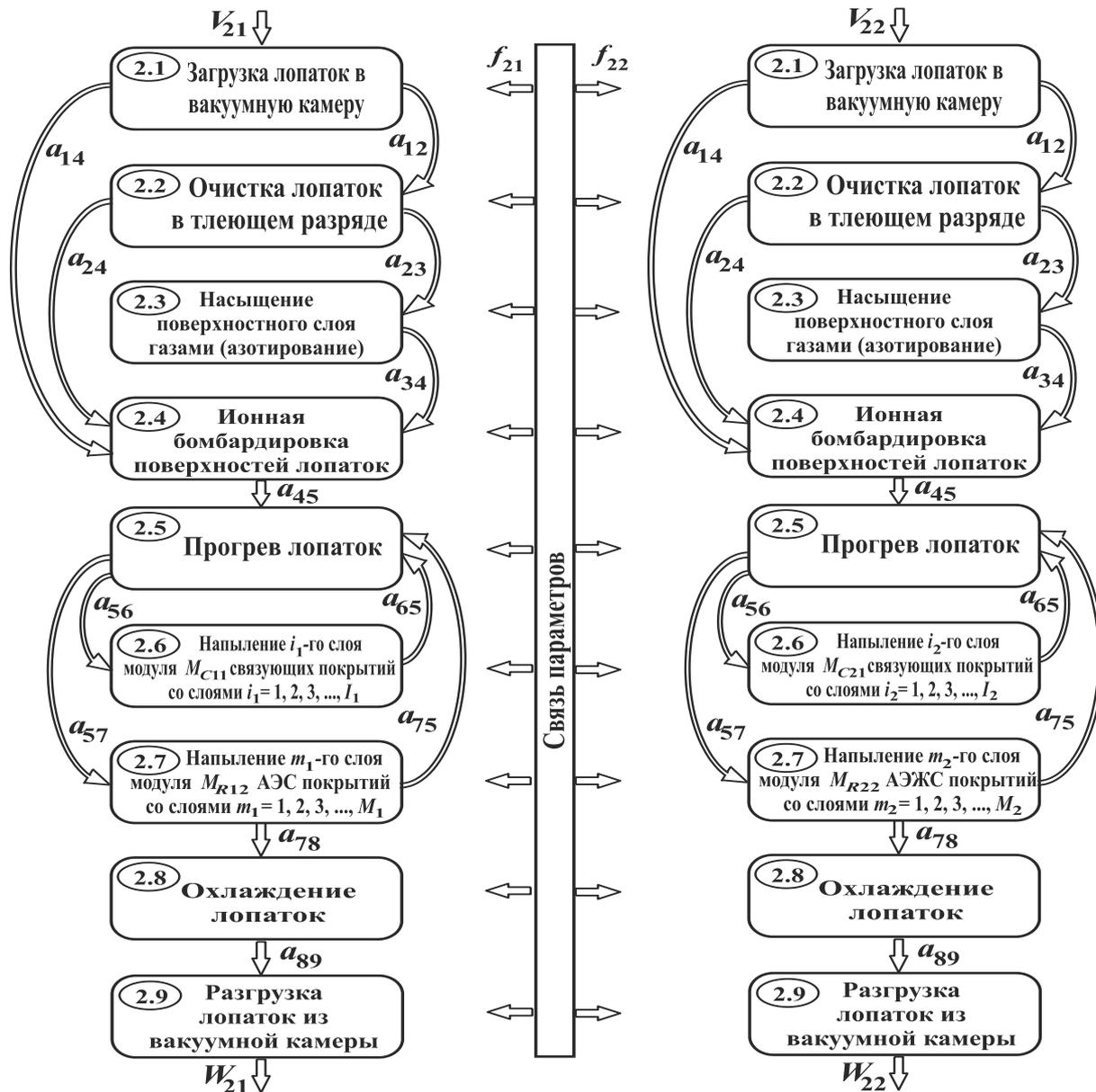


Рисунок 10. Структура 2-го этапа технологического процесса для напыления покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом связей параметров качества их покрытий для лопаток турбокомпрессора в соответствии покрытием рис. 6

На рис. 11 представлена структура технологических процессов 2-го этапа технологического процесса напыления покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом связей параметров качества их покрытий для новых лопаток турбокомпрессора. Данная структура технологического процесса выполняется в соответствии покрытием, приведенным на рис. 7. В этом случае, покрытие лопатки компрессора аналогично

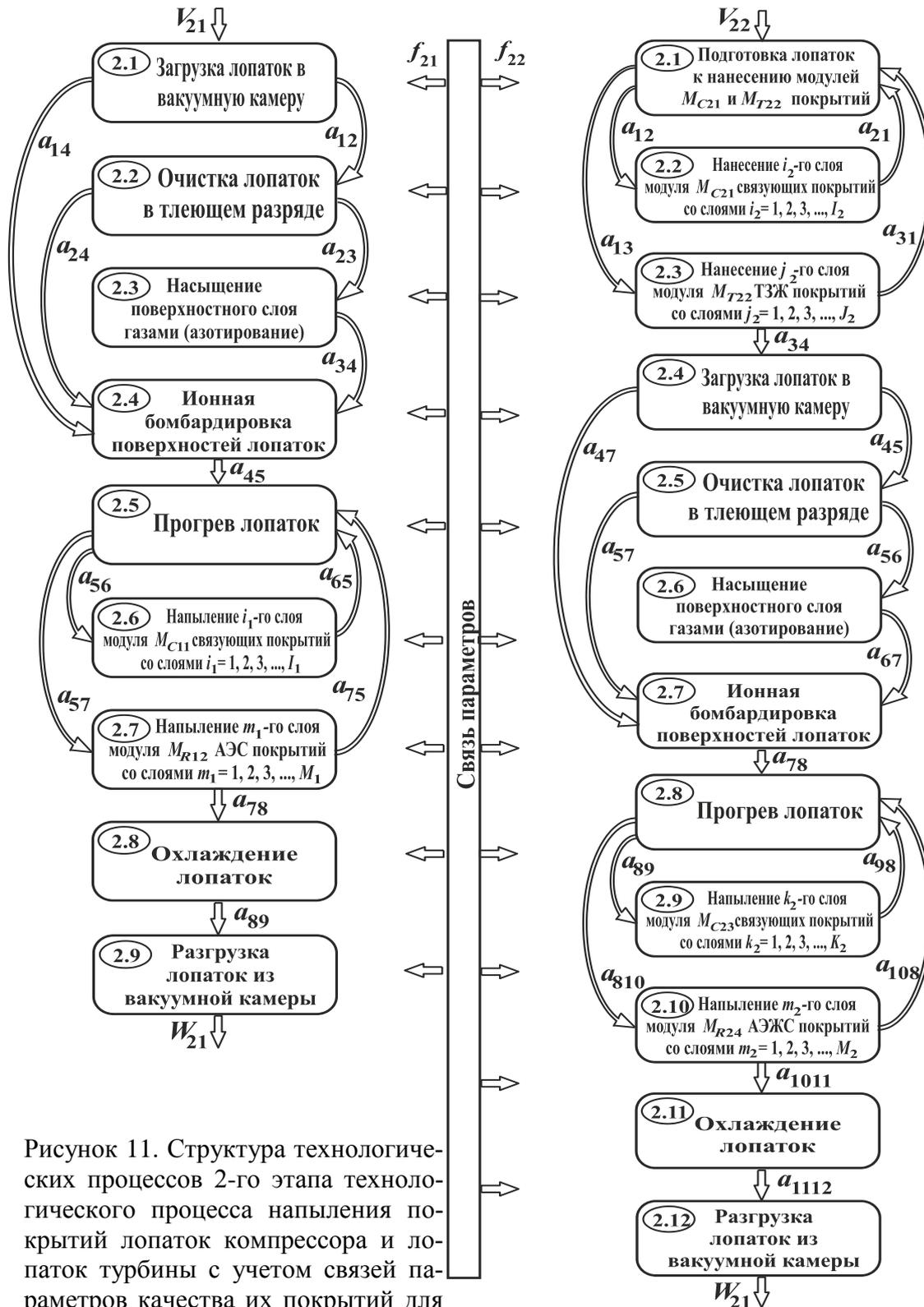


Рисунок 11. Структура технологических процессов 2-го этапа технологического процесса напыления покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом связей параметров качества их покрытий для новых лопаток турбокомпрессора в соответствии покрытием рис. 7

покрытию рис. 6, а покрытие лопаток турбины имеет четыре модуля (рис. 7). Эти четыре модуля имеют следующую структуру:

-  $M_{C21}$  - первый модуль связующих покрытий, общая его толщина обычно составляет 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает основной материал лопатки с температура-защитным жаростойким покрытием;

-  $M_{T22}$  - модуль температура-защитных жаростойких покрытий, общая его толщина обычно составляет 300 ... 400 мкм, данный модуль покрытий снижает проникновение температуры к основному материалу лопатки из условия  $\xi = 0,8 \dots 1,5$  °C/мкм;

-  $M_{C23}$  - второй модуль связующих покрытий, общая его толщина обычно составляет 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает температура-защитное жаростойкое покрытие с абразива-эрозионно-жаростойким покрытием;

-  $M_{R24}$  - модуль абразива-эрозионно-жаростойких покрытий, общая его толщина рекомендуется в пределах 8,0 ... 20,0 мкм.

Следует отметить, что в данном случае первый и второй модули покрытий могут наноситься, например, детонационно-газовым методом, а третий и четвертый модуль вакуумным ионно-плазменным методом.

При этом на рис. 11 показано:  $V_{21}$  и  $W_{21}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопаток компрессора, соответственно;  $V_{22}$  и  $W_{22}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопаток турбины, соответственно. Между структурами технологических процессов действуют связи  $f_{21}$  и  $f_{22}$ .

В этом случае, структура технологического процесса нанесения ФОП<sub>1</sub> на лопатки компрессора соответствуют структурной схеме рис. 10. При этом структура технологического процесса нанесения ФОП<sub>2</sub> для лопаток турбины состоит из двух частей (рис. 11).

Первая часть технологического процесса нанесения ФОП<sub>2</sub> на лопатки компрессора имеет следующие составляющие:

2.1. Подготовка лопаток к нанесению модулей  $M_{C21}$  и  $M_{T22}$  покрытий.

2.2. Нанесение  $i_2$ -го слоя модуля  $M_{C21}$  связующих покрытий со слоями  $i_2 = 1, 2, 3, \dots, I_2$ .

2.3. Нанесение  $j_2$ -го слоя модуля  $M_{T22}$  температура-защитного жаростойкого покрытия со слоями  $j_2 = 1, 2, 3, \dots, J_2$ .

Вторая часть технологического процесса нанесения ФОП<sub>2</sub> на лопатки компрессора (правая часть структуры (рис. 11)), а именно представленная позициями 2.4 ... 2.12 (рис. 11), имеет составляющие полностью аналогичные левой части (рис. 11).

Возможны и другие перспективные структурные варианты технологических процессов нанесения ФОП лопаток турбокомпрессора. В этом случае, методом морфологического анализа генерируется полное множество возможных вариантов технологических процессов напыления ФОП, и затем отыскиваются доминирующие варианты, например, методом направленного их поиска.

Далее, выполняется 3-й этап (завершающий) технологического процесса ОУО для ФОП<sub>1</sub> лопаток компрессора и ОУО для ФОП<sub>2</sub> лопаток турбины. Структура 3-го этапа комплексного технологического процесса ОУО новых лопаток турбокомпрессора представлена на рис. 12. Здесь, представлены два потока технологических процессов для лопаток компрессора и лопаток турбины. На рис. 12 показано:  $V_{31}$  и  $W_{31}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопаток компрессора, соответственно;  $V_{32}$  и  $W_{32}$  – входной и выходной потоки технологического процесса для лопа-

ток турбины, соответственно. Между структурами технологических процессов действуют связи  $f_{31}$  и  $f_{32}$ .

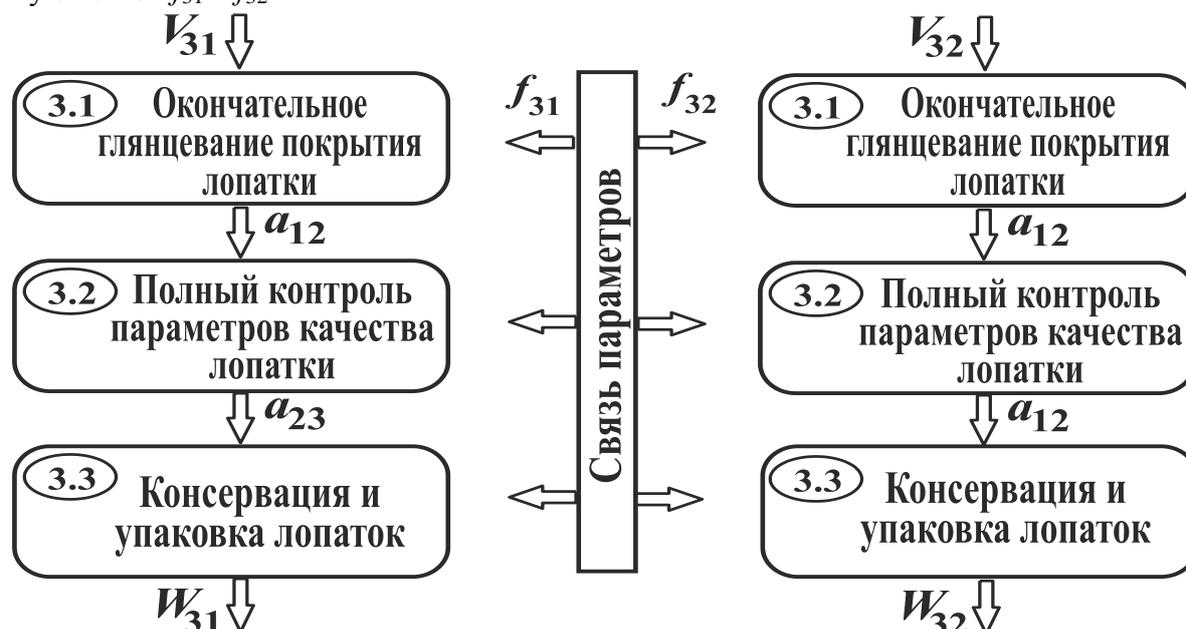


Рисунок 12. Структура технологических процессов 3-го этапа технологического процесса ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом связей параметров качества их поверхностей для новых лопаток

Структура 3-го этапа технологических процесса ОУО лопаток турбокомпрессора формируется на трех операциях:

- 3.1. Окончательное глянецование покрытия лопатки.
- 3.2. Полный контроль параметров качества лопатки.
- 3.3. Консервация и упаковка лопаток.

Следует отметить, что возможны и другие перспективные структурные варианты процессов нанесения ФОП лопаток. В этом случае, методом морфологического анализа генерируется полное множество возможных вариантов технологических процессов напыления ФОП, и затем отыскиваются доминирующие варианты, например, методом направленного их поиска.

## 5. Заключение

Таким образом, приведенные в данной работе результаты направлены на повышение ресурса ГТУ на основе применения ФОП и выравнивания ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины путем синтеза структуры технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с ФОП.

Для решения этих вопросов в представленной работе выполнен анализ схемы связей свойств лопаток для выполнения последующей разработки технологического обеспечения процессов реализации ФОП и выравнивания ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины. При этом выполнена разработка структурных вариантов покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины для формирования их функционально-ориентированных свойств на базе ФОП. А также в работе проведен синтез структуры комплексного технологического процесса ОУО лопаток с ФОП. На основе этих исследований представлены структуры технологических процессов.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Пичко, А. П. К определению структурной надежности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, – 2018. – Вып. 2 (61). – С. 64 - 74.
2. Пичко, А. П. Эксплуатационные особенности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности и общий подход в повышении их свойств / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 3 (62). – С. 47 - 54.
3. 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 сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 1 (64). – С. 68 - 77.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Михайлов, А. Н. Новые тенденции в повышении ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов [и др.] // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» в г. Петропавловск-Камчатский 17-19 октября 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – С. 43-47.
6. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. – Донецк, 2016. – 22 с.
7. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: учеб. пособие. / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
8. Богуслаев, В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – 335 с.
9. Авиаинформ [Текст] / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2018. – Вып. № 12 (177). – 153 с.
10. Михайлов, В. А. Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. В. Байков // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2017. – № 9. – С. 42-48.

Поступила в редколлегию 14.05.2019 г.