УДК 621.01(06)

Д.А. Михайлов, ассистент
Донецкий национальный технический университет, Украина
Тел.: +38 (095) 0739343; *E-mail:* tehmash@fmm.donntu.edu.ua

СИНТЕЗ СТРУКТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье приведены данные по структурному синтезу технологического обеспечения вакуумных камер ионно-плазменных установок. Здесь предложено выполнять создание компоновочной схемы планшайбы на базе принципиально-структурной модели. Принципиально-структурная модель формируется на основе композиции структурной модели, пространственной компоновки и принципиальной кинематической схемы движений функциональных элементов планшайбы вакуумной камеры. Рациональный вариант принципиально-структурных моделей определяется технико-экономическими показателями вакуумной ионно-плазменной установки. В работе показаны особенности синтеза технологического обеспечения на генерированном множестве возможных вариантов принципиально-структурных моделей планшайб вакуумной камеры.

Ключевые слова: *синтез, планшайба вакуумной камеры, принципиально-структурная модель, производительность установки*

1. Введение

Наиболее нагруженными деталями газотурбинных двигателей (ГТД), определяющими их ресурс, являются лопатки [1]. Элементы лопаток 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. Температура на лопатках первой ступени турбины может достигать 1200 ^{O}C [2]. При этом цикличность знакопеременных напряжений приводит к разрушению лопаток вследствие термической усталости из-за возникающих микротрещин и изменения свойств материала.

А также можно отметить, что лопатки ГТД работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре, что в ряде случаев приводит к возникновению газовой коррозии. При том наличие влажности и пыли в воздушном потоке оказывают химико-абразивное изнашивание элементов лопаток, а именно поверхностей, входных и выходных кромок пера.

Особенно значительное изнашивание элементов пера лопаток проявляется у ГТД вертолетов, например ТВ3-117, эксплуатирующихся в пустынях с песчаными бурями, в местностях, с пылевыми и соляными составляющими в воздушных потоках, образующихся из-за эрозии почвы, вблизи действующих вулканов с выбросами пепла и тому подобными особенностями. Это приводит к снижению долговечности лопаток и ГТД в целом.

Для повышения долговечности лопаток ГТД применяются различные технологические методы и способы увеличения их эксплуатационных свойств [3, 4, 5]. В част-

ности для снижения износа элементов пера лопаток применяют вакуумное ионно-плазменное (электродуговое) напыление специальных композиционных покрытий, образованных на основе нитрид титана, нитрид цирконий титана и других соединений. Вместе с тем, применение этих видов напыления требует решения вопросов повышения технико-экономических показателей. Прежде всего, повышения производительности и снижения себестоимости напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий. На практике эти вопросы решаются за счет повышения концентрации рабочих позиций в вакуумной камере. Однако в этом случае сразу возникает целый ряд вопросов. Прежде всего, сколько лопаток можно располагать в вакуумной камере? Какая структура рабочих позиций будет наиболее рациональной для тех или иных видов лопаток? Какие пространственные связи в расположении лопаток необходимо реализовать? А также, какую кинематику движений элементов приспособления необходимо обеспечить, чтобы уменьшить влияние теневых зон на качество напыляемого покрытия. На эти и другие вопросы в данной статье сделана попытка дать ответы.

Целью данной работы является повышение производительности и снижение себестоимости напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатки ГТД за счет дальнейшего повышения их концентрации в вакуумной камере путем реализации специальной структуры рабочих позиций технологической оснастки, выполнения необходимых пространственных связей между ее элементами и обеспечения требуемой кинематики движений ее элементов из условия обеспечения равномерности толщины покрытия на поверхностях лопатки.

В соответствии с поставленной целью, в данной работе определены следующие задачи исследований: определить необходимые варианты концентрации изделий в вакуумной камере ионно-плазменной установки; предложить возможные виды структур расположения рабочих позиций вакуумной камеры; исследовать виды пространственных связей расположения рабочих позиций в вакуумной камере; выполнить анализ кинематики движений лопаток в вакуумной камере; разработать общие принципы проектирования технологической оснастки из условия обеспечения равномерности толщины покрытия на поверхностях лопаток. Эти задачи решаются в данной работе.

2. Особенности концентрации изделий в вакуумной камере

Главной задачей синтеза технологического обеспечения вакуумной камеры является определение необходимой концентрации рабочих позиций вращающейся оснастки или мощности множества рабочих позиций вакуумной камеры. При этом концентрация рабочих позиций или мощности множества рабочих позиций вакуумной камеры или общая плотность изделий вакуумной камеры определяется по следующей формуле:

$$v = П_Ц T_Ц = \frac{V}{V_0}, \quad (1)$$

где v - мощность множества рабочих позиций вакуумной камеры;

$П_Ц$ - цикловая производительность напыления покрытий на лопатки;

$T_Ц$ - полный технологический цикл напыления покрытий на лопатки ГТД;

V - общий объем вакуумной камеры;

V_0 - удельный объем вакуумной камеры для расположения одной рабочей позиции (лопатки).

Можно отметить, что при проектировании вакуумной камеры процесс определения мощности множества рабочих позиций зависит от необходимой цикловой произво-

дительности $П_Ц$ установки. Время полного технологического цикла $T_Ц$ напыления покрытия на лопатки ГТД обычно задается предварительно.

Задаваясь конкретными параметрами цикловой производительности $П_Ц$ и временем полного технологического цикла $T_Ц$ в выражении (1) можно определить необходимое количество напыляемых лопаток v в соответствии с заданными начальными условиями. Когда необходимо определить объём вакуумной камеры можно воспользоваться следующим выражением

$$V = П_Ц T_Ц V_0 .$$

В случае, когда необходимо вести процесс дальнейшего повышения производительности установки, с заданным объемом вакуумной камеры, можно воспользоваться следующими условиями:

$$\left.\begin{array}{l} v \to \max , \\ \mathrm{V}_0 \to \min . \end{array}\right\}$$

Процесс определения множества рабочих позиций вакуумной камеры имеет следующие ограничения:

- возникновением эффекта «теневые зоны», этот эффект действует в случае особенностей пространственного расположения лопаток относительно друг друга и в случае особенностей кинематического движения лопатки относительно катодов установки;
- наличием предельной удельной плотности лопаток в вакуумной камере, которая определяется по следующей формуле $P = 1/v$;
- особенностями структуры технологического обеспечения, пространственных связей между элементами структуры и кинематики движений лопаток в вакуумной камере.

3. Структурные модели технологической оснастки вакуумной камеры

Когда определена мощность множества рабочих позиций вакуумной камеры (концентрация рабочих позиций) составляется их структура. Структура рабочих позиций характеризует внутреннюю организацию, порядок и построение технологической оснастки и представляет собой совокупность элементов и отношений между ними.

Структура рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры представляет собой совокупность упорядоченных множеств y и a, которую представляем следующим образом:

$$Str = \{y, a\},$$

где Str - рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры;

y - множество рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры;

a - множество отношений на множестве y.

Здесь множества y и a имеют вид:

$$y = \{y_1, y_2, ..., y_v\},$$

где y_η - η-й элемент множества y;

$$a = \{a_1, a_2, ..., a_{v_i}\},$$

где a_η - η-е отношение между элементами множества y.

Однако для реализации структуры рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры необходимо определить параметры множеств y и a.

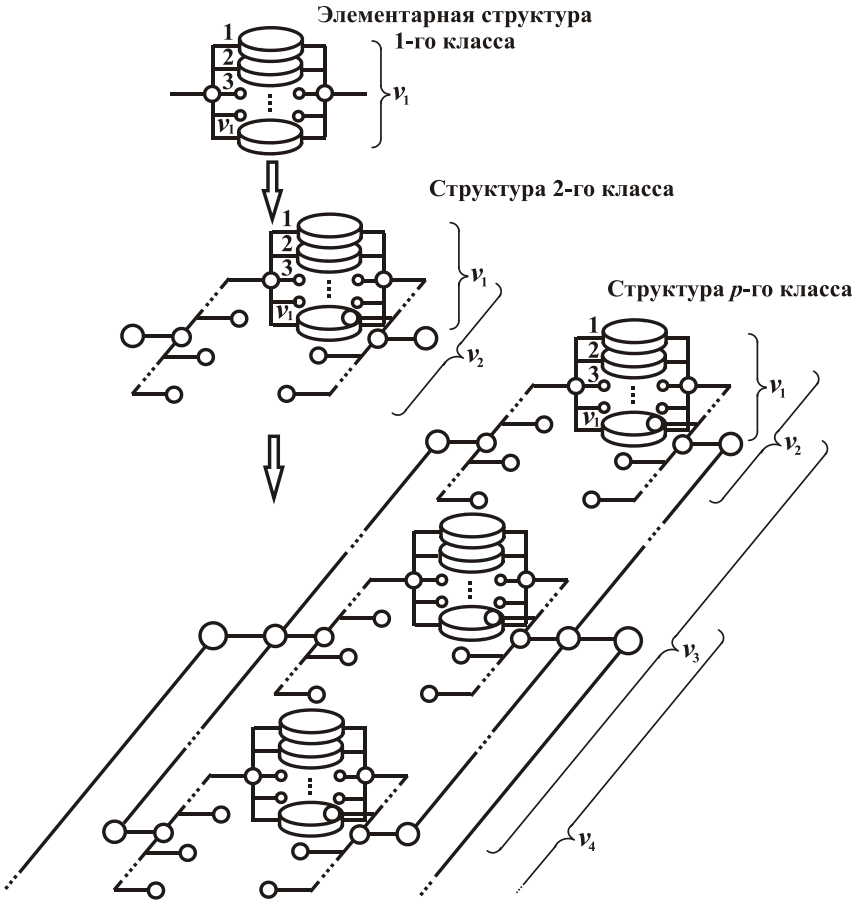


Рис. 1. Особенности формирования структуры рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки

Процесс формирования структуры рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки (рис. 1) основывается на следующем.

Сначала формируется элементарная структура 1-го класса, затем из этих элементарных структур составляется структура 2-го класса, потом – структура 3-го класса, и так далее до создания структуры *p*-го класса. В этом случае, мощность множества рабочих позиций будет определяться на основании следующего выражения:

$$v = \prod_{k=1}^{p} v_k ,$$

где v_{ik} - мощность множества элементов подсистемы *k*-го класса;

p – количество классов подсистем на множестве рабочих позиций ионно-плазменной установки.

Для представленной структуры (рис. 1), цикловая производительность вакуумной ионно-плазменной установки определяется по следующей формуле

$$П_Ц = \frac{\prod_{k=1}^{p} v_k}{T_Ц} .$$

Структурная модель рабочих позиций оснастки вакуумной камеры по классам подсистем может быть представлена следующим образом:

$$Str = \{Str_1, Str_2, ..., Str_P\},$$

где Str_k - структура подсистем *k*-го класса технологической оснастки вакуумной камеры установки.

Общую структурную модель состава рабочих позиций можно представить следующим выражением

$$Str = \bigcup^{v_P} \cdots \bigcup^{v_2} \bigcup^{v_1} y_\eta .$$

4. Варианты пространственных моделей

В представленном ранее выражении (4), определяющем структуру рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки, множество отношений *a* на множестве рабочих позиций *y* остается неизвестным. Поэтому здесь необходимо определить пространственные отношения между рабочими позициями. Эти вопросы могут решаться на базе пространственных моделей, приведенных на рис. 2.

На рис. 2 показаны варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры, а именно: на рис. 2,а – цилиндрическая, на рис. 2,б – усеченный конус, на рис. 2,в - сложной формы, на рис. 2,г – полусфера. Здесь цифрами обозначено следующее: 1 – пространственная форма модели, 2 – рабочие позиции технологической оснастки. Следует заметить, что возможны и другие варианты пространственных моделей. Процесс выбора той или иной модели зависит от технологических особенностей напыления покрытий и видов лопаток ГТД.

Можно отметить, что на базе элементарных моделей технологической оснастки можно создавать их комбинированные варианты. На рис. 3 представлены варианты комбинированных пространственных моделей технологической оснастки. Здесь показано: рис. 3,а – цилиндр-цилиндр, рис. 3,б – цилиндр-усеченный конус, рис. 3,в – цилиндр-сложная форма, рис. 3,г – цилиндр-полусфера. Цифрами обозначено следующее: 1 – пространственная форма модели первого уровня, 2 – пространственная форма модели второго уровня, 3 - рабочие позиции технологической оснастки. Применение подобных моделей возможно для случаев напыления покрытий на лопатки различных видов. А также следует заметить, что возможно целое множество различных комбиниро-

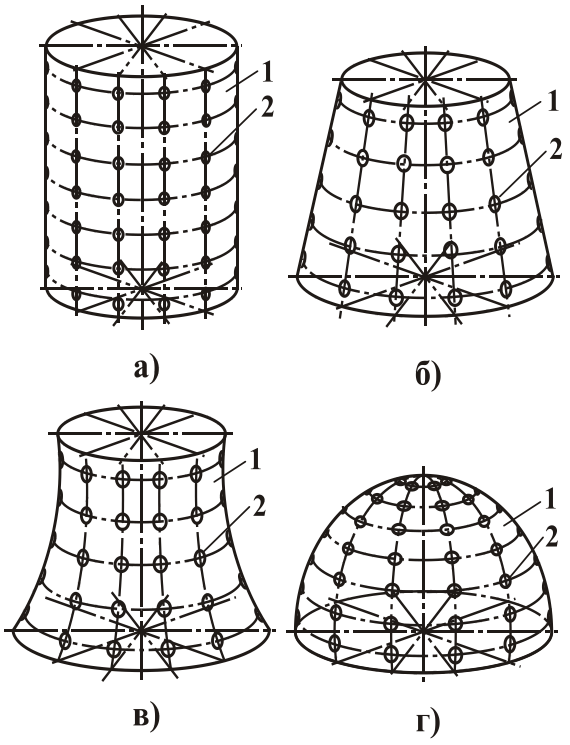


Рис. 2. Варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры: а – цилиндрическая, б – усеченный конус, в - сложной формы, г - полусфера

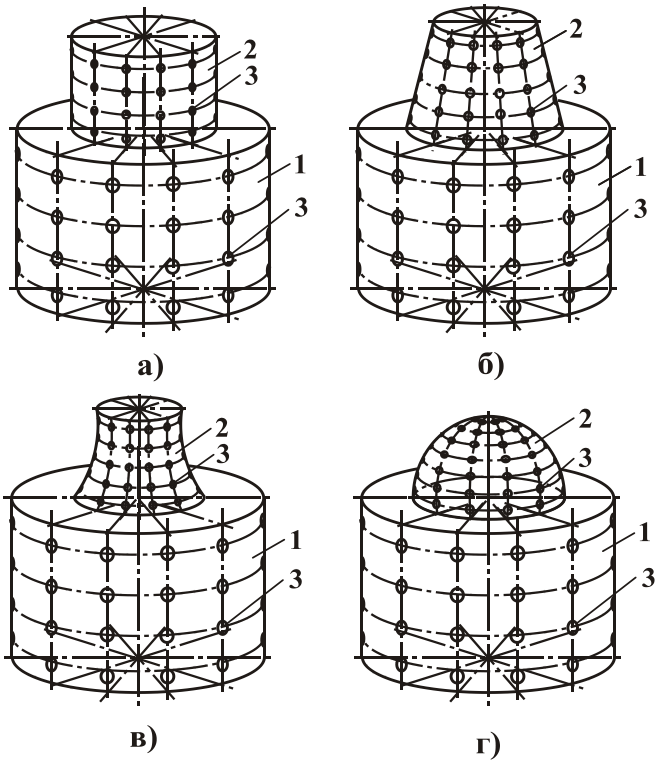


Рис. 3. Варианты комбинированных пространственных моделей технологической оснастки: а – цилиндр-цилиндр, б – цилиндр-усеченный конус, в – цилиндр-сложная форма, г – цилиндр-полусфера

ванных вариантов пространственных моделей оснастки, которые определяются технологическими условиями процесса напыления покрытий.

На рис. 4. представлены другие варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры, а именно: рис. 4,а – многоуровневая, рис. 4,б – биороторная, рис. 4,в – глобоидная. На рис. 4,а цифрами показано следующее: 1, 2, 3 – уровни расположения рабочих позиций в технологической оснастке; 4 – рабочие позиции оснастки (каждый уровень предназначен для лопаток заданного вида). На рис. 4,б показано: 1, 2, 3, 4, 5 – элементы биороторной планшайбы; 6 – рабочие позиции оснастки. На рис. 4,в представлена глобоидная модель, здесь показано: 1 – тороидальная поверхность модели, 2 – глобоидная кривая траектории движения рабочей позиции, 3 - рабочие позиции оснастки.

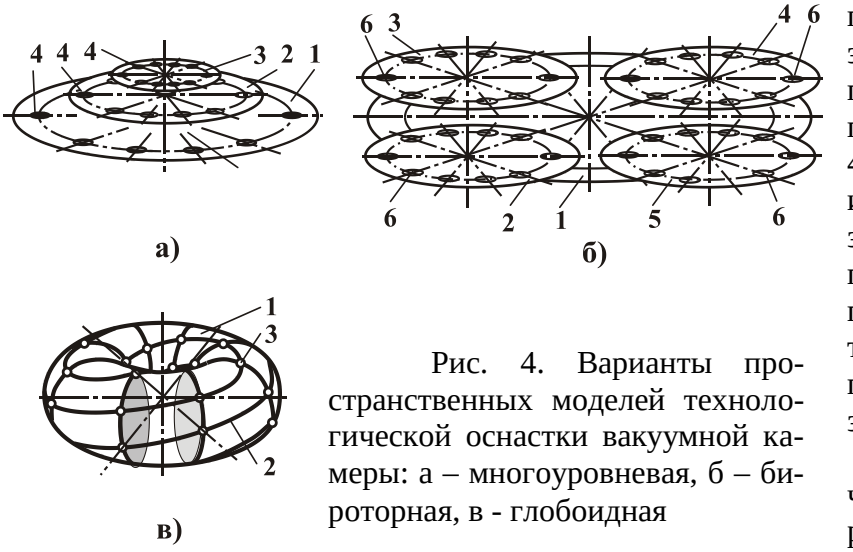


Рис. 4. Варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры: а – многоуровневая, б – биороторная, в - глобоидная

Можно отметить, что построение траекторий движения изделия в вакуумной камере решается на базе композиции преобразований декартовых систем координат и преобразований движений в этих системах координат.

Для определения рационального варианта технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки выполняется генерирование полного множества различных вариантов моделей и на этом множестве определяется рациональный или доминирующий вариант приспособления.

5. Кинематические схемы движений элементов технологической оснастки

При схематическом изображении технологической системы или оснастки, принцип ее работы показывается с помощью принципиальной кинематической схемы, на которой представляются элементарные движения в соответствующих системах координат. Принципиальная кинематическая схема это схема, на которой с помощью условных обозначений изображаются элементарные движения, их количество, состав и пространственное расположение. Под элементарными движениями понимаются два вида движений: поступательное (Trans) и вращательное (Rot) движение. При этом кинематика технологической оснастки может иметь элементарную или сложную структуру и специфические особенности ее реализации.

Проектирование технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки базируется на основе принципиальных кинематических схем. В соответствии с принятой принципиальной кинематической схемой, технологические элементы и подсистемы, в процессе работы всей системы технологической оснастки, перемещаются относительно друг друга по траекториям относительного движения. При этом эти перемещения выполняются со скоростями, предопределяемыми режимами и параметрами напыления покрытий на изделия, наличием теневых зон, структурой технологической оснастки и особенностями конструкции лопатки ГТД.

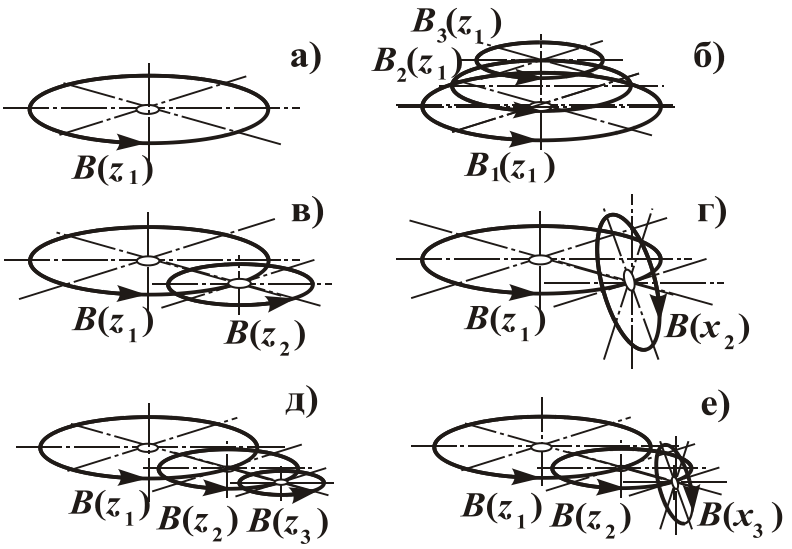


Рис. 5. Принципиальные кинематические схемы движений элементов технологической оснастки:а – одно вращательное движение; б – три вращательных движений вокруг оси z_1; в – два вращательных движений вокруг осей z_1 и z_2; г - два вращательных движений вокруг осей z_1 и x_2; д – три вращательных движений вокруг осей z_1, z_2 и z_3; е - три вращательных движений вокруг осей z_1, z_2 и x_3

На рис. 5 представлены некоторые варианты принципиальных кинематических схем движений элементов технологической оснастки. Эти принципиальные кинематические схемы составлены на базе следующих элементарных движений: рис. 5,а – одно вращательное движение; рис. 5,б – три вращательных движений вокруг оси z_1; рис. 5,в – два вращательных движений вокруг осей z_1 и z_2; рис. 5,г - два вращательных движений вокруг осей z_1 и x_2; рис. 5,д – три вращательных движений вокруг осей z_1, z_2 и z_3; рис. 5,е - три вращательных движений вокруг осей z_1, z_2 и x_3.

В общем случае кинематика движений принципиальной кинематической схемы может быть представлена следующим множеством:

$$a = \{a_1, a_2, ..., a_P\},$$

где a_k – элементарное движение подсистемы технологической оснастки k-го класса.

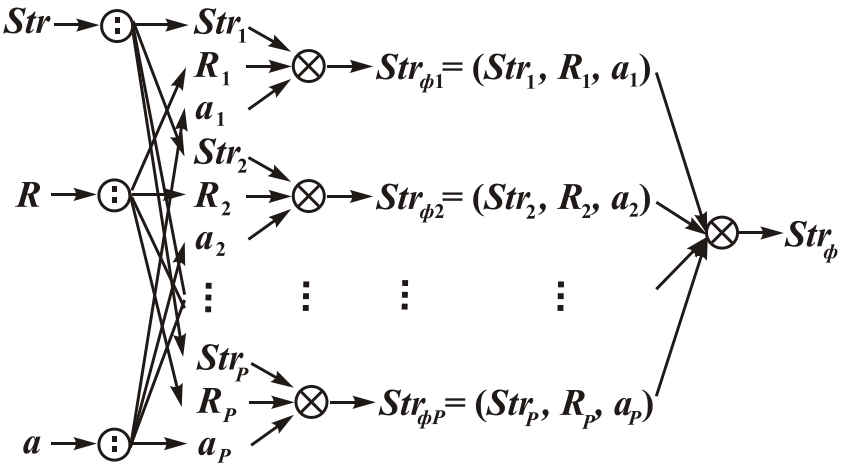
Можно отметить, что на рис. 5 представлены только некоторые варианты принципиальных кинематических схем движений элементов технологической оснастки. Здесь возможно целое множество различных их вариантов. Заданная схема определяется особенностями проектирования технологической оснастки, а необходимые варианты могут формироваться на базе методов морфологического анализа.

6. Общие особенности проектирования технологической оснастки

Процесс проектирования технологических систем, в том числе и технологической оснастки вакуумной камеры, это процесс последовательного наращивания сложности оборудования. Поэтому обычно технологические системы проектируются за несколько этапов, при этом постепенно наращивается уровень сложности проектируемой системы. Важным этапом проектирования технологической системы является процесс, основанный на базе принципиально-структурных моделей. Принципиально-структурная модель формируется на основе композиции структурной модели, пространственной компоновки и принципиальной кинематической схемы движений функциональных элементов планшайбы вакуумной камеры.

Разработанная общая схема проектирования принципиально-структурных моделей технологической оснастки вакуумной камеры основывается на операциях декомпозиции структурной модели, пространственной модели и принципиальной кинематической схемы на подсистемы и элементы k-го класса, композиции из этих подсистем и элементов множества элементарных кортежей, затем композиции из этих кортежей об-

щей принципиально-структурной модели. В целом этот процесс базируется на принципе композиции, который можно представить следующим выражением:



где Str, Str_k, $Str_{фk}$ и $Str_ф$ - структуры общей, k-го класса, функциональной k-го класса и функциональной общей, соответственно;

R и R_k - составы общей и k-го класса пространственных моделей, соответственно;

a и a_k - составы общей и k-го класса кинематических схем, соответственно;

⊙ и ⊗ - операции декомпозиции и композиции элементов в модели, соответственно.

В целом процесс синтеза принципиально-структурных моделей технологической оснастки вакуумной камеры можно реализовывать на базе морфологической матрицы, представленной на рис. 6. Здесь процесс проектирования принципиально-структурных моделей реализуется на базе композиции структурных моделей, пространственных моделей и кинематических схем. С помощью принципиально-структурной модели формируется компоновочная схема технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки.

На рис. 7 представлен общий вид некоторых вариантов технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки. Здесь показаны

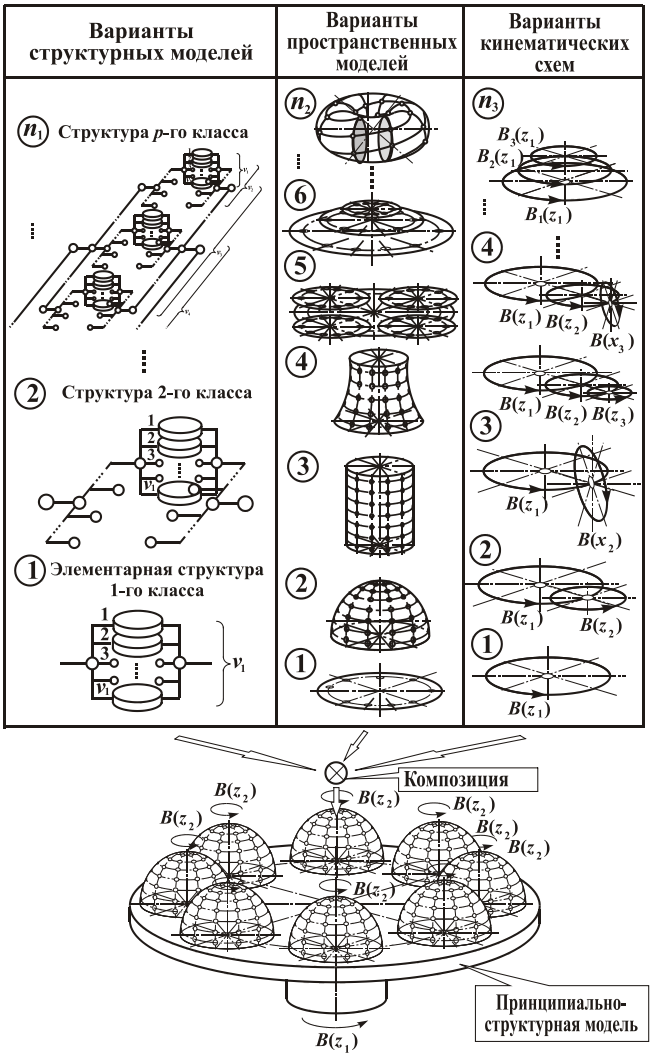
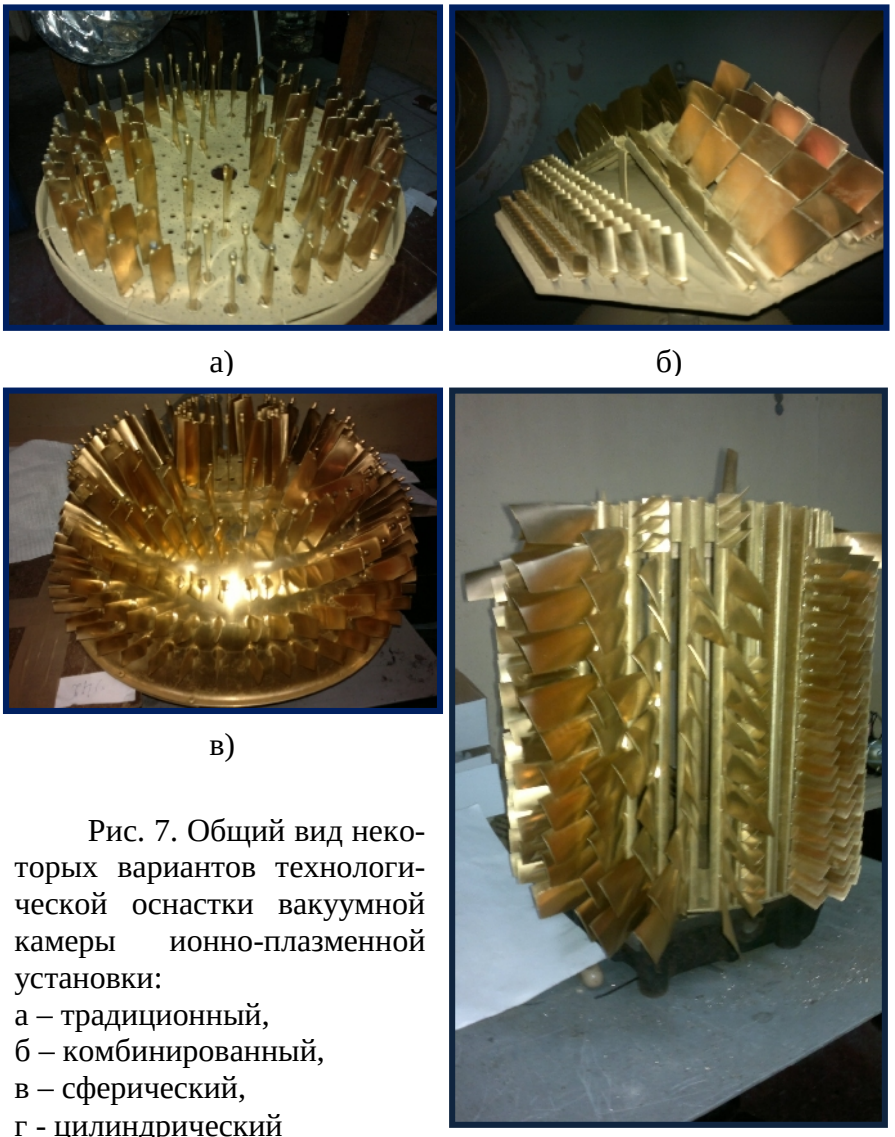


Рис. 6. Морфологическая матрица синтеза принципиально-структурных моделей технологической оснастки вакуумной камеры

следующие варианты: рис. 7,а – традиционный, рис. 7,б – комбинированный, рис. 7,в – сферический, рис. 7,г – цилиндрический.

Можно отметить, технологическая оснастка, представленная на рис. 7,а и рис. 7,в предназначена для лопаток направляющего аппарата ГТД модели ТВ3-117. При этом концентрация рабочих позиций оснастки рис. 7,в в 2 раза выше, чем оснастки, представленной на рис. 7,а. Технологическая оснастка, представленная на рис. 7,б и рис. 7,г, предназначена для лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117. Здесь, концентрация рабочих позиций оснастки рис. 7,г в 1,6 раза выше, чем оснастки, представленной на рис. 7,б. На основании этого, производительность напыления нитрид титановых покрытий на установке ННВ 6.6-И1 на лопатки ГТД увеличивается в соответствии с применяемым оборудованием. Также можно отметить, что выполненные исследования процесса напыления покрытий на лопатки позволили установить, что напыляемые покрытия на рабочие поверхности лопаток с применением разработанных приспособлений имеют равномерную толщину в пределах заданного допуска.



а) б) в) г)

Рис. 7. Общий вид некоторых вариантов технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки:
а – традиционный,
б – комбинированный,
в – сферический,
г - цилиндрический

7. Заключение

Таким образом, разработанные в этой работе основы проектирования технологической оснастки вакуумных ионно-плазменных установок позволяют создавать высокопроизводительное оборудование и снизить себестоимость напыления покрытий на лопатки ГТД за счет концентрации рабочих позиций. Выполненные исследования позволили решить следующее:

- определить необходимые варианты концентрации изделий в вакуумной камере ионно-плазменной установки;

- предложить возможные виды структур расположения рабочих позиций вакуумной камеры;

- исследовать виды пространственных связей расположения рабочих позиций в вакуумной камере;

- выполнить анализ кинематики движений лопаток в вакуумной камере;

- разработать общие принципы проектирования технологической оснастки из условия обеспечения равномерности толщины покрытия на поверхностях лопаток.

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. Богуслаев В.А., Качан А.Я., Долматов А.И., Мозговой В.Ф., Кореневский Е.Я. Технология производства авиационных двигателей. Ч. 1. Основы технологии. - Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 518 с. ISBN 966-87-2.

4. 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.

5. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с. ISBN 5-89594-066-8.

Д.О. Михайлов

СИНТЕЗ СТРУКТУРНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВАКУУМНИХ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

У статті наведено дані по структурному синтезу технологічного забезпечення вакуумних камер іонно-плазмових установок. Тут запропоновано виконувати створення компонувальною схеми планшайби на базі принципово-структурної моделі. Принципово-структурна модель формується на основі композиції структурної моделі, просторової компонування і принциповою кінематичної схеми рухів функціональних елементів планшайби вакуумної камери.

Ключові слова: *синтез, планшайба вакуумної камери, принципово-структурна модель, продуктивність установки.)*

D. Mikhaylov

SYNTHESIS OF STRUCTURAL SUPPORT PVD SYSTEMS TO ENSURE COVERAGE GAS TURBINE ENGINE BLADES

The article presents data on the structural synthesis of technological support PVD systems. Here requested to perform the creation of the faceplate layout scheme based on principle and structural model. This model is based on the composition of several models. The rational alternative models defined technical and economic performance PVD system. The paper shows the characteristics of the synthesis of technological support to generate lots of possible models chucks vacuum chamber.

Keywords: *synthesis, chuck vacuum chamber, in principle, the structural model, the performance of the installation.*

Надійшла до редколегії 30.05.2013 р.