

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ. СИНТЕЗ СТРУКТУРНЫХ ВАРИАНТОВ

Михайлов А.Н., Михайлова Е.А., Аль-Судани Т.Я., Михайлов Д.А.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Аннотация. В работе приведены результаты по созданию технологических процессов напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на изделия машиностроения. Выполнена разработка универсальной структуры технологического процесса напыления покрытий. Проведен анализ частных случаев структуры технологических процессов напыления покрытий. Даны рекомендации по напылению покрытий.

Ключевые слова: изделие машиностроения, вакуумное ионно-плазменное покрытие, технологический процесс напыления покрытий, универсальный технологический процесс.

1. Введение

В технологии машиностроения процесс проектирования технологических процессов базируется на одном из главных принципов научно-технического прогресса – унификации [1]. На основании этого принципа выполняется деление изделий и технологических процессов на унифицированные подмножества. В частности, в зависимости от организационно-технологической формы, все технологические процессы делятся – единичные и унифицированные. К унифицированным технологическим процессам относятся типовые, групповые и модульные технологические процессы [2]. Унификация технологических процессов позволяет упростить процессы проектирования частных вариантов технологических процессов для конкретных изделий машиностроения, а также повысить качество их изготовления для различных типов производства [1, 2].

Вместе с тем, выполненный анализ работ [3, 4], связанных с разработкой технологий напыления покрытий вакуумными ионно-плазменными установками показал, что в настоящее время не разработаны унифицированные структуры технологических процессов напыления покрытий. Это обусловлено тем, что процесс напыления покрытий данным методом сложен и многогранен [3], требующий дополнительных исследований в данном направлении. А также это связано с тем, что покрытия напыляют на большое множество различных изделий (металлорежущие инструменты из различных материалов, мерительные инструменты, различные типы изделий). Поэтому исследования по унификации технологических процессов напыления покрытий вакуумным ионно-плазменным методом на изделия машиностроения является актуальной проблемой технологии машиностроения.

Целью данной работы является унификация технологических процессов напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий за счет разработки универсальной структуры технологического процесса напыления покрытий, обеспечивающей возможность выполнять синтез конкретных структурных вариантов технологических процессов нанесения покрытий для заданных изделий машиностроения.

В представленной работе предусматривается решить следующие задачи: выполнить анализ существующих технологических процессов напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на изделия машиностроения; разработать универсальную струк-

туру технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий, позволяющую синтезировать конкретные структурные варианты технологических процессов для изделий машиностроения; провести синтез частных вариантов технологических процессов напыления покрытий и выполнить их анализ. Эти задачи решаются в данной работе.

2. Основное содержание работы

Вакуумные ионно-плазменные покрытия поверхностей изделий могут быть следующих типов[1]:

- однослойные покрытия;
- многослойные покрытия.

На рис. 1 представлены структурные варианты вакуумных ионно-плазменных покрытий. Здесь показано: рис. 1,а – однослойное покрытие типа *ЕЕН*, рис. 1,б – многослойное покрытие типа *ЕЕП*.

Однослойные покрытия (рис. 1,а) могут формироваться на базе одного или нескольких материалов или их композиций. В этом случае, по высоте покрытия свойства

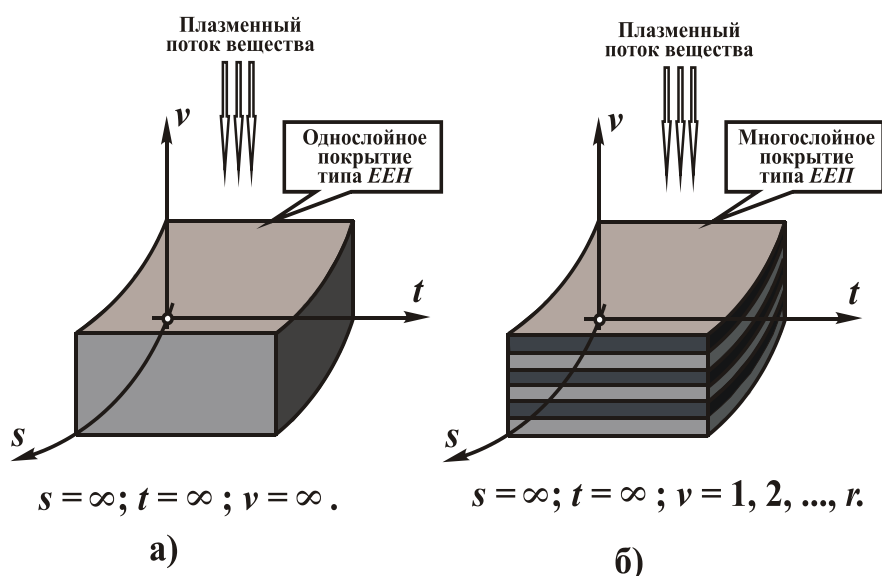


Рис. 1. Структурные варианты вакуумных ионно-плазменных покрытий:

- а – однослойное покрытие типа *ЕЕН*,
б – многослойное покрытие типа *ЕЕП*

наносимого покрытия одинаковые и оно формируется непрерывно. Эти покрытия в направлении *s* и *t* по поверхности изделия формируются одновременно (*ЕЕ*). В направлении *v* покрытие формируется непрерывно (*Н*). Поэтому в целом однослойное покрытие можно обозначить как тип *ЕЕН*. Математическая структурно-

функциональная символьная модель этого покрытия может быть представ-

лена следующим выражением:

$$V_o \rightarrow \bigwedge_{v=1}^{\infty} \left(\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v \right), \quad (1)$$

где V_o - обозначение однослойного покрытия типа *ЕЕН*;

$(dl_s \times dl_t \times dl_v)$ - декартово произведение в *s*-м, *t*-м и *v*-м направлении или окрестность объемной точки;

\bigwedge - предекат алгебры логики (конъюнкция) или обозначение непрерывности процесса напыления покрытия в направлении *v*.

Многослойные покрытия (рис. 1,б) формируются слоями. При этом в каждом слое в направлении s и t по внутренней цилиндрической поверхности изделия формируются одновременно (EE). В направлении v покрытие формируется прерывисто (II). Поэтому в целом данное многослойное покрытие можно обозначить как тип $EEII$. Математическая структурно-функциональная символьная модель этого покрытия может быть представлена следующим выражением:

$$V_m \rightarrow \bigvee_{v=1}^n \left(\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v \right), \quad (2)$$

где V_m - обозначение многослойного покрытия типа $EEII$;

n - число слоев различных покрытий;

\bigvee - предекат алгебры логики (дизъюнкция) или обозначение прерывистости процесса напыления покрытия в направлении v .

Следует отметить, что толщина каждого слоя многослойного покрытия в общем случае может быть различной и зависеть от функциональных особенностей данного покрытия.

Приведенные математические структурно-функциональные символьные модели однослойных и многослойных покрытий поверхностей изделия позволяет выполнять синтез заданных или требуемых свойств изделий.

Каждый технологический процесс можно описывать структурированным множеством операций. При этом процесс проектирования таких технологических процессов может иметь многовариантные решения по структуре и эффективности. Это зависит от особенностей технологической структуры процесса. Поэтому далее будет рассмотрен вопрос, связанный с особенностями синтеза структурных вариантов технологических процессов напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий поверхностей изделий.

Гипотетическая модель технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий реализует функцию φ преобразования N множества входов процесса $V = \{V_k\}$ в множество выходов $W = \{W_m\}$, которая описывается отображением $\varphi: \{V_k\} \rightarrow \{W_m\}$.

Каждый технологический процесс напыления покрытия на поверхности изделия может состоять из n операций. Операция это законченная часть технологического процесса, выполняемая в процессе преобразования изделия. Согласованная совокупность операций представляет собой технологический процесс. Структура технологического процесса зависит в первую очередь от технологии и представляет собой иерархические образования, которые можно разделить на операции.

Понятие структура технологического процесса характеризует внутреннюю организацию, порядок и построение технологического процесса напыления покрытия на изделия. Представляя операции технологического процесса как совокупность элементов и отношений между ними, строится математическая модель структуры. Если $T = \{t_1, t_2, \dots, t_s\}$ есть множество элементов (операций) технологического процесса, а $A = \{a_1, a_2, \dots, a_x\}$ - множество отношений, то структура технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделия представляет собой множество, состоящее из T и A :

$$Str_T = \{T, A\}, \quad (3)$$

где Str_T - структура технологического процесса;

T – множество подпроцессов;

A – множество отношений.

Технологический процесс напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий задается структурой. При этом технологический процесс с заданной структурой имеет однозначный алгоритм преобразования заготовки в изделие. Заметим, что алгоритм преобразования заготовки в изделие не определяет однозначно структуру технологического процесса, так как один и тот же алгоритм преобразования может реализовываться различными способами. Понятие отношения служит в математике [5, 6] для выражения на теоретико-множественном языке связей между объектами. Обобщением понятия отношения является соответствие.

При построении технологических процессов напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделия особое значение имеют следующие отношения: с помощью математических функций, пространственные отношения и временные отношения [6].

Отношения с помощью математических функций. Это класс отношений, который выражает математические функции как закономерные зависимости от переменной. Такого рода математические функции представляют точно установленное отношение между элементами с детерминированной связью.

Пространственные отношения характеризуют взаимное положение элементов в пространстве и определяют границы объемно-пространственной структуры пространственно-функциональной единицы технологического процесса.

Временные отношения описывают упорядочение процессов и событий во времени. Кроме того, в практике проектирования технологических процессов значительную роль при принятии конкретных решений играют также отношения подобия, аналогии, гомоморфизма, изоморфизма, идентичности, эквивалентности, логики и другие.

Для наглядности структура технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделия может быть представлена с помощью графа $G(T, A)$, где T – множество вершин графа, отражающих множество элементов (операций) технологического процесса; A – набор упорядоченных и неупорядоченных пар вершин, отражающих отношения элементов. Неупорядоченная пара вершин называется ребром, упорядоченная пара – дугой. Граф, содержащий только ребра, называется неориентированным, а граф, содержащий только дуги – ориентированным. Более детальные рекомендации по представлению графов для технологических процессов приведены в работе [5, 6].

На рис. 2 представлен граф универсального технологического процесса нанесения покрытия на поверхности изделия. Здесь последовательно показаны все возможные операции t_1, t_2, \dots, t_{10} , где 10 - общее количество возможных операций технологического процесса. С помощью ориентированных ребер a_1, a_2, \dots, a_x , где x - общее количество ориентированных ребер графа, показаны возможные связи между операциями технологического процесса напыления покрытий на поверхности изделия. Любое из ребер можно представить следующим обозначением $a_y = a_i^j$, где i - любая данная операция технологического процесса, а j - любая последующая операция технологического процесса.

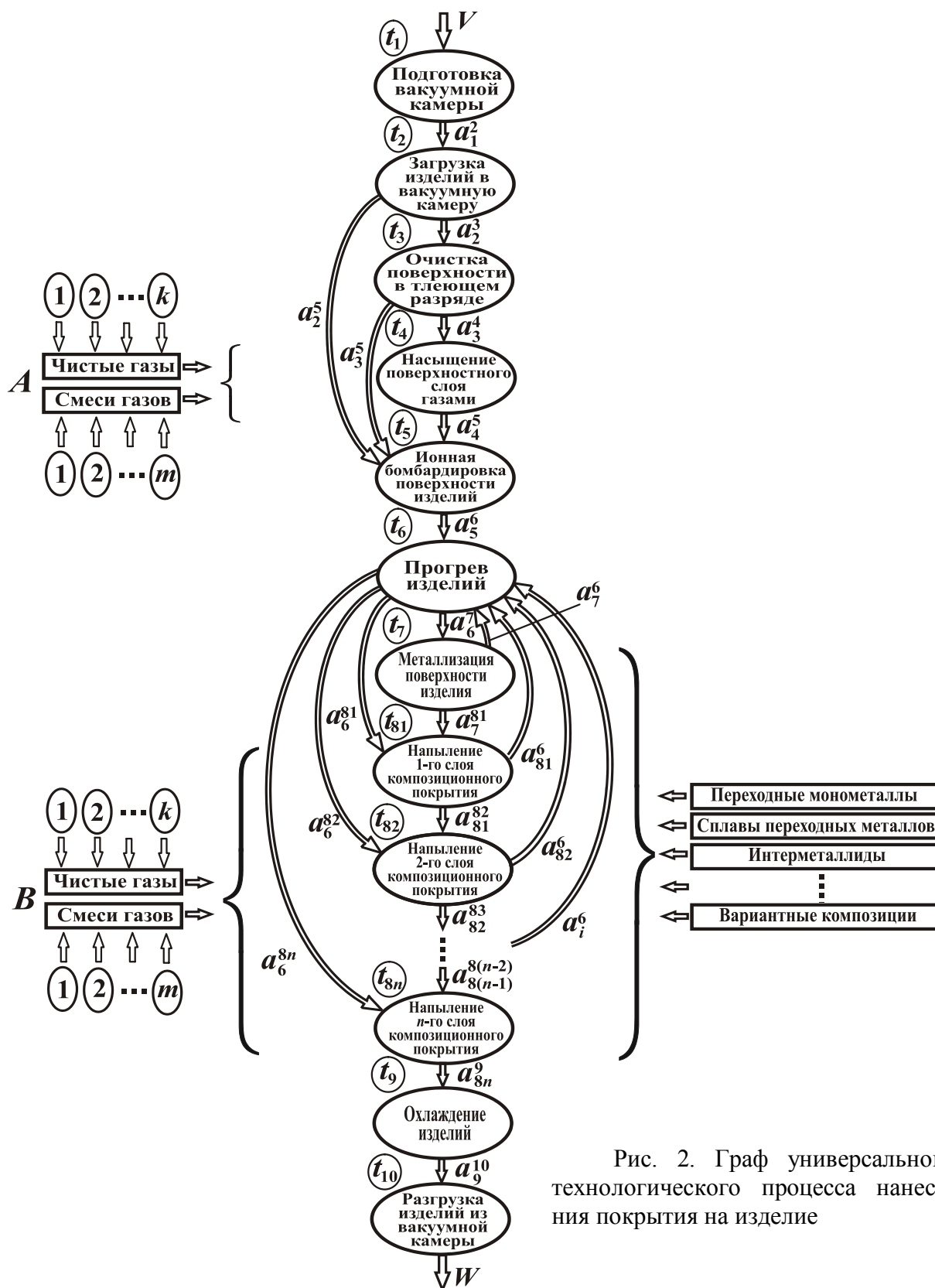


Рис. 2. Граф универсального технологического процесса нанесения покрытия на изделие

Разработанный граф технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделий, представленный на рис. 2, является универсальным, так как он учитывает все возможные варианты структуры технологи-

ческого процесса. На базе этого универсального графа технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий выполняется синтез конкретных вариантов технологических процессов. Здесь варьируемые параметры могут быть следующие операции технологического процесса:

- очистка поверхности изделия в тлеющем разряде t_3 ;
- насыщение поверхностного слоя изделия газами t_4 , этот процесс может выполняться с помощью чистых газов или их смесей (позиция A (рис. 2));
- металлизация поверхности изделия, этот процесс может выполняться с помощью монометаллов, сплавов металлов, интерметаллидов или их вариантных композиций (катоды);
- количество слоев композиционного покрытия, этот процесс выполняется на базе композиции вещества катодов и газов (позиция B).

Варьируя эти параметры универсального технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий можно создавать конкретные варианты технологических процессов напыления покрытий варьируемых по функциональным свойствам.

Можно отметить, что для обеспечения заданных параметров качества и производительности необходимо выполнять синтез рациональных вариантов структуры технологического процесса нанесения ионно-плазменного покрытия на изделия. Рассмотрим более детально этот процесс.

Граф универсального технологического процесса нанесения покрытия на изделия, представленный на рис. 1, можно представить с помощью двух этапов.

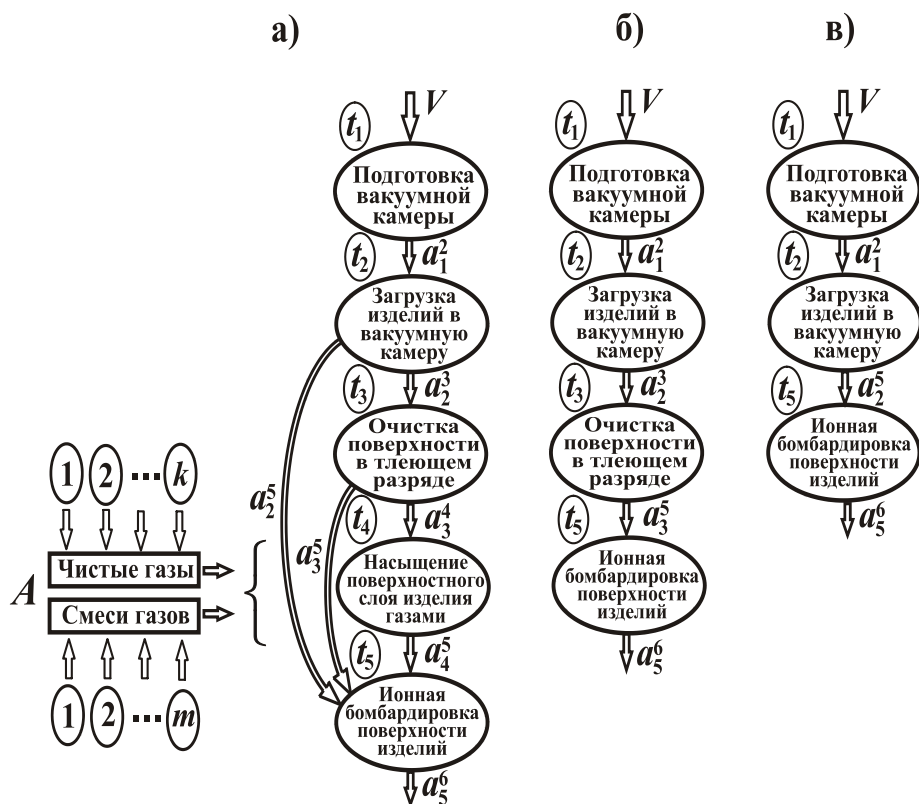


Рис. 3. Структурные варианты 1-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке:

а – вариант полного состава операций, б – вариант укороченного состава операций, в – вариант неполного состава операций

Первый этап универсального технологического процесса состоит из следующих операций $t_A = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$, второй этап универсального технологического процесса – из следующих операций $t_B = \{t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}\}$.

Рассмотрим особенности проектирования первого этапа технологического процесса. На рис. 3. представлены структурные варианты 1-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной

ионно-плазменной установке. На рис. 3,а показан структурный вариант полного состава операций, на рис. 3,б – вариант укороченного состава операций, на рис. 3,в – вариант неполного состава операций

Приведенные на рис. 3 структурные варианты 1-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке позволяют решать заданные технологические задачи по подготовке изделия к нанесению покрытий.

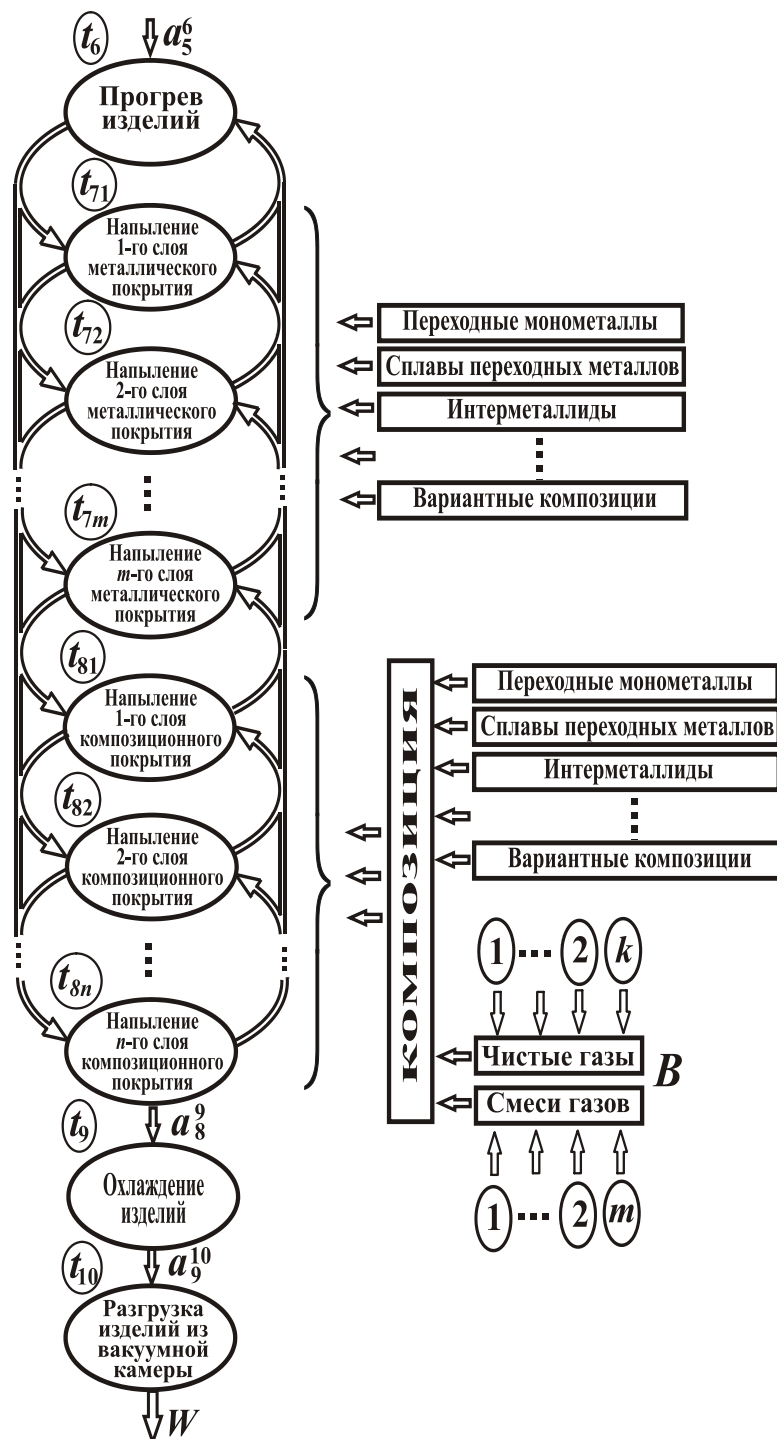


Рис. 4. Структурный вариант полного состава операций 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке

Для нанесения различных вариантов покрытий применяется структурные варианты 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке. Разработанная структура технологического процесса обеспечивает возможность нанесения следующих типов покрытий:

- однослойные покрытия,
- многослойные покрытия.

А также в зависимости от вида покрытий разработанная структура технологического процесса позволяет выполнять следующие покрытия:

- металлические покрытия,
- композиционные покрытия.

На рис. 4 представлен структурный вариант полного состава операций 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке. Эта структура позволяет решать вопросы как нанесения однослойных и многослойных покрытий, так и металлических и композиционных по-

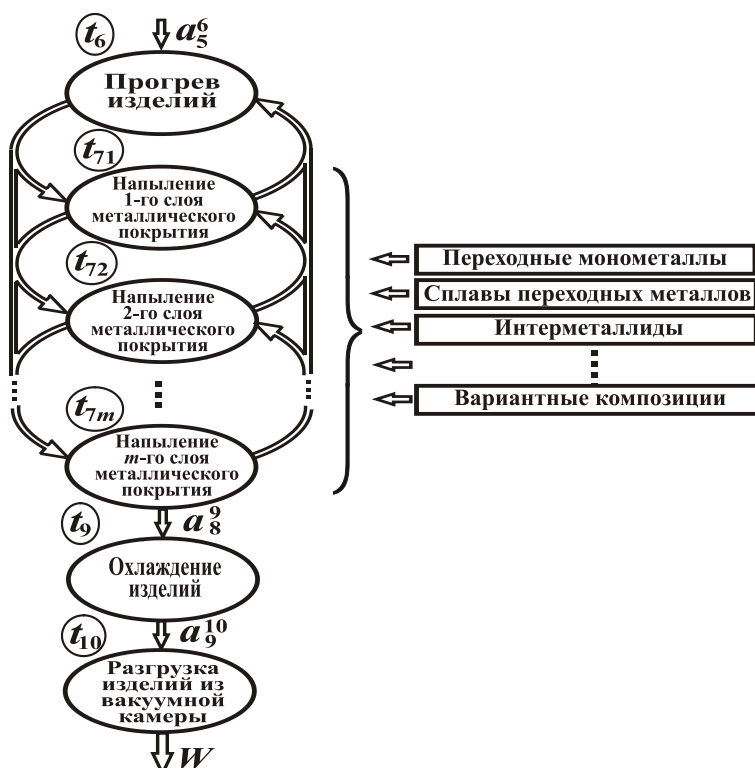


Рис. 5. Структурный вариант операций металлизации 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке

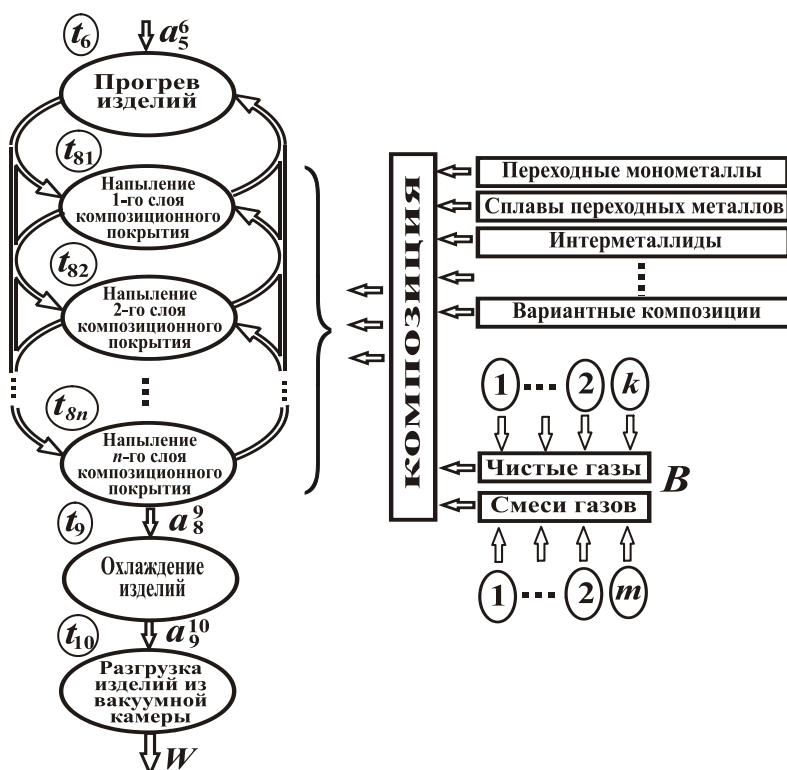


Рис. 6. Структурный вариант операций нанесения композиционных покрытий 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке

крытий.

В ряде случаев технологические процессы с полным составом операций не нужны. В этом случае могут применяться технологические процессы, предназначенные только для металлизации поверхности изделия или для нанесения композиционных покрытий.

В связи с этим, на рис. 5. представлен структурный вариант операций для металлизации 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке. На рис. 6 представлен структурный вариант для операций нанесения композиционных покрытий 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке.

3. Заключение.

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать универсальную структуру технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделий. С помощью этой универсальной структуры технологического процесса можно вести синтез конкретных вариантов технологических процессов для изделий с заданными функциональными свойствами.

ствами, для их эксплуатации в машине или технологической системе.

Список литературы: 1. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. 2. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с. 3. Внуков Ю.Н., Марков А.А., Лаврова Л.В., Бердышев Н.Ю. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент. – Киев, Тэхника, 1992. – 143 с. 4. Машиностроение. Энциклопедия. / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. // Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III – 8. / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 744 с. 5. Берж К. Теория графов и ее приложения. – М.: ИЛ, 1982. – 319 с. 6. Математический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 847 с.

Надійшла до редколегії 17.02.2010 р..

**РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ. СИНТЕЗ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ**

Михайлов О.М., Михайлова О.О., Аль-Судані Т.Я., Михайлов Д.О. (ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)

Анотація. У роботі наведені результати по створенню технологічних процесів напилювання вакуумних іонно-плазмових покриттів на вироби машинобудування. Виконано розробку універсальної структури технологічного процесу напилювання покриттів. Проведено аналіз окремих випадків структури технологічних процесів напилювання покриттів. Дано рекомендації з напилювання покриттів.

Ключові слова: виріб машинобудування, вакуумне іонно-плазмове покриття, технологічний процес напилювання покриттів, універсальний технологічний процес.

**THE DEVELOPMENT of the UNIVERSAL STRUCTURE of the TECHNOLOGICAL
PROCESS of the EVAPORATION COATING. SYNTHESSES STRUCTURED VARIANT**

Mikhaylov A.N., Mikhaylova E.A., Al-Sudani T.Y., Mikhaylov D.A. (DonNTU, Donetsk, Ukraine)

The Abstract. Results are brought in work on making the technological processes of the evaporation physical vapor deposition coatings on products of machine building. The Executed development of the universal structure of the technological process of the evaporation coatings. The Organized analysis quotient events of the structure of the technological processes of the evaporation coatings. Recommendations are given on evaporation coatings.

The keywords: product of machine building, physical vapor deposition coating, technological process of the deposition of physical vapor deposition coatings, universal technological process.