

В целом проведенные испытания показали высокие защитные свойства ТЗП с соединительным слоем ПНХ20К20Ю13 без шликерного алитирования и ПНХ20К20Ю13 (или ПНХ16Ю7) со шликерным алитированием и внешним керамическим слоем из керамик О-4 ( $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$ ; микрогранулированный порошок), О-5 ( $ZrO_2 \cdot Yb_2O_3$ ) и О-7 ( $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$ ; порошок с округлыми частицами, сфероидизированный). Эти покрытия обеспечивают длительную защиту сплавов ВЖ155, ВЖ159, ВЖ155У (ВЖ171) в области температур 1100–1200°C, не снижают длительной жаропрочности сплавов, позволяют в 2 раза и более повысить термостойкость сплавов и обеспечивают теплозащитный эффект  $>100^\circ C$  при толщине керамического слоя покрытия  $\sim 120$  мкм. Следует отметить, что использование слоя, напыленного из порошка  $ZrO_2 \cdot Yb_2O_3$ , в качестве внешнего слоя покрытия позволяет на 20–30% снизить коэффициент теплопроводности керамического слоя покрытия (по сравнению со стандартным керамическим слоем из  $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$ ). Поэтому целесообразно продолжить исследования ТЗП с керамическим слоем на основе  $ZrO_2 \cdot Yb_2O_3$  в условиях, максимально приближенных к натурным испытаниям.

Рассмотренные плазменные и комплексные (плазменные + шликерные) теплозащитные покрытия могут успешно применяться для защиты крупногабаритных деталей горячего тракта ГТД и позволят повысить  $>2$  раза ресурс деталей, а также снизить уровень эмиссии камер сгорания современных газотурбинных двигателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мубояджян С.А. Высокотемпературные ионно-плазменные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Аэрокосмический журнал. Май-июнь 1998, с. 74–75.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД //ГТТ, 2001, №3(12), с. 30–32.

УДК 620.197

*А.Н. Луценко, С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский*

#### **ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ**

Несмотря на значительные успехи в области создания покрытий для лопаток турбин и компрессоров авиационных ГТД, в частности для защиты поверхности конструкционных материалов от окисления или эрозионно-коррозионного повреждения, композиции сплав–покрытие уже не обеспечивают в полной мере необходимого уровня эксплуатационных свойств, что возможно связано с возросшими требованиями по обеспечению надежности ответственных деталей и применением технологии, не решающей поставленной задачи. Поэтому в последнее время появилось большое число работ, направленных на исследование возможности повышения надежности деталей ГТД с использованием поверхностного модифицирования. Ожидаемый прирост служебных свойств материала деталей в этих работах связывают с целенаправленным изменением структурно-фазового состояния поверхности различными, часто конкурирующими между собой методами. К ним можно отнести обработку пучками ускоренных частиц, плазменными потоками, лазерным излучением и ряд других методов, пригодных для легирования тонкого поверхностного слоя, управления напряженным со-

стоянием и рельефом поверхности. Выбор методов обработки поверхности при этом очень широк – от достаточно сложных по используемой аппаратуре электронно-лучевых технологий, например обработки и наплавки поверхности пучком релятивистских электронов [1] или закалки низкоэнергетическими электронными пучками [2], до более простых с использованием различных видов электрического разряда.

Таким образом, разработка перспективной технологии обработки поверхности, в которой (технологии) нанесение защитного покрытия и ионная обработка (модифицирование) поверхности являлись бы взаимно связанными процессами, обеспечивающими максимальный срок службы деталей ГТД, является актуальной задачей. В основу решения такой задачи может быть положена обработка поверхности металлов и сплавов в плазме вакуумного дугового разряда методами ионно-плазменной технологии, которая позволяет получать покрытия и проводить ионное модифицирование поверхности в однотипных технологических процессах, на однотипном оборудовании, по единой технологической схеме (за один технологический цикл). В настоящее время на двигателестроительных предприятиях авиационной промышленности России для получения различных типов защитных и упрочняющих покрытий на деталях ГТД широко используются разработанная в ВИАМ вакуумная ионно-плазменная технология высоких энергий и установки МАП-1 и МАП-1(М) [3, 4]. Установки используются для нанесения жаростойких защитных покрытий на рабочие лопатки турбин серийных двигателей РД-33, АЛ-31Ф, Д-30КП(КУ), ПС-90А и т. д. Опыт эксплуатации установок показывает, что они обеспечивают необходимый уровень качества при нанесении на детали ГТД многокомпонентных металлических конденсированных и диффузионных покрытий и их комбинаций. Но при разработке новых типов покрытий и технологических процессов обработки поверхности уровень автоматизации управления рабочим процессом установок МАП-1, МАП-1(М) и контроль параметров процесса недостаточны. Ужесточение требований к стабильности свойств покрытий, разработка новых процессов с изменяющимися во времени технологическими параметрами – причина того, что такие параметры – потенциал подложки, давление реактивных газов, температура поверхности деталей и т. д. – не могут быть обеспечены оператором установки в ручном режиме, что ограничивает внедрение в серийное производство новых ионно-плазменных технологий [5].

Целью данной работы являлась разработка промышленных технологических ионно-плазменных процессов получения защитных покрытий на жаропрочных никелевых сплавах (ЖС) на новой установке МАП-2 с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП).

### **Промышленная ионно-плазменная установка МАП-2 с АСУ ТП**

В ВИАМ на базе ионно-плазменной установки МАП-1(М) разработана новая установка МАП-2 с АСУ ТП. Внешний вид установки показан на рис. 1. Автоматизация установки предполагает проведение технологических процессов ионной обработки поверхности деталей ГТД из никелевых, титановых сплавов и специальных сталей при помощи управляющей компьютерной программы. Программа оценивает состояние систем и агрегатов установки и выдает управляющие сигналы на контроллер, осуществляющий связь между компьютером и исполнительными элементами. Постоянный контроль заданных оптимальных параметров технологического про-



Рис. 1. Общий вид установки МАП-2 с АСУ ТП

цесса, сохранение и архивирование текущих значений определяют высокую точность и повторяемость характеристик наносимых покрытий (толщина, состав, адгезия к основе) и тем самым обеспечивают заданные ресурс и надежность работы лопаток и других деталей ГТД.

АСУ ТП установки МАП-2, структурная схема которой представлена на рис. 2, реализована на базе промышленных контроллеров и промышленного компьютера для обеспечения бесперебойной работы всех электрических схем на всех стадиях технологического процесса.

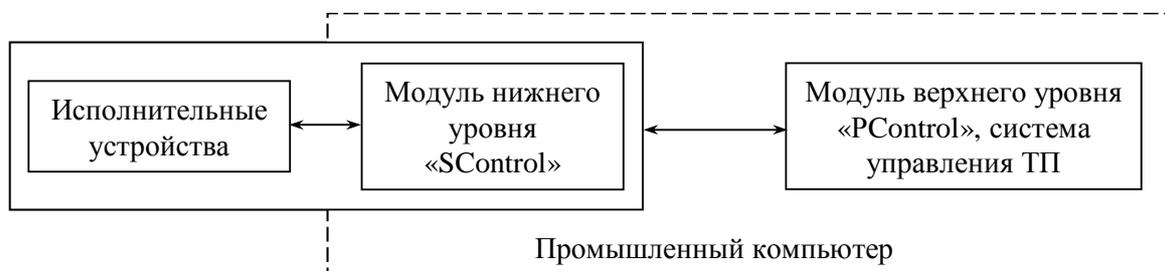


Рис. 2. Структурная схема АСУ ТП «МАП-2»

Платформой для программного обеспечения АСУ ТП «МАП-2» является операционная система Microsoft Windows 2000 (NT 5.0). АСУ ТП «МАП-2» состоит из двух основных модулей – модуля нижнего уровня управления – «SControl» (рис. 3) и модуля верхнего уровня управления – «PCControl».

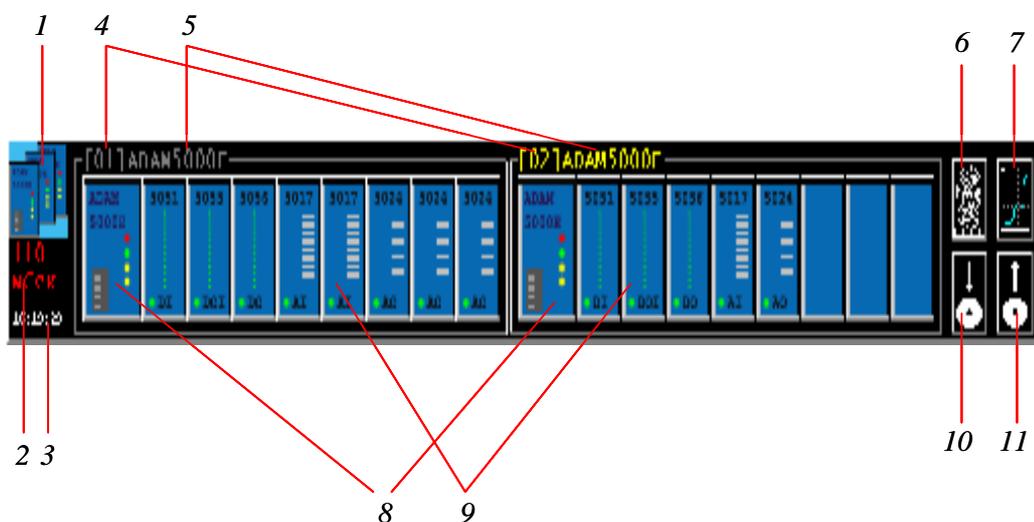


Рис. 3. Модуль нижнего уровня «SControl» АСУ ТП «МАП-2»:

1 – кнопка с пиктограммой (сворачивает окно модуля); 2 – время рабочего цикла модуля (в миллисекундах); 3 – системное время; 4 – номер контроллера; 5 – тип контроллера; 6 – кнопка вызова окна для ввода пароля; 7 – кнопка вызова окна графического представления сигналов; 8 – кнопки вкл./выкл. контроллера; 9 – кнопки вызова окна соответствующего модуля контроллера; 10 – кнопка для сохранения настроек программного модуля; 11 – кнопка для загрузки настроек программного модуля

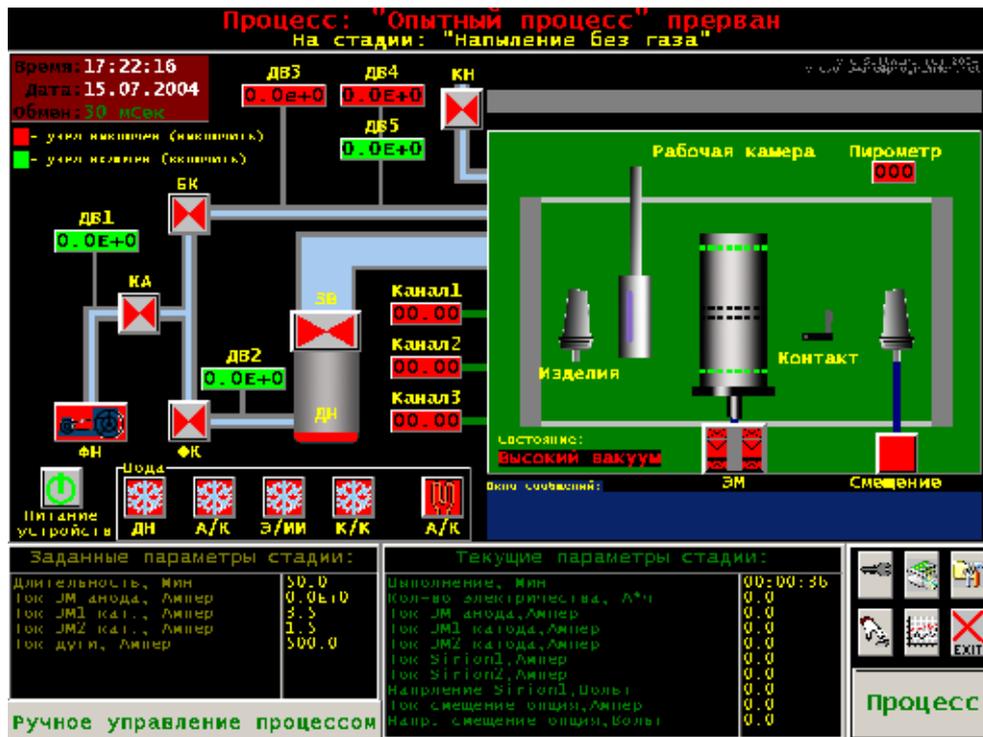


Рис. 4. Модуль верхнего уровня «PControl» АСУ ТП «МАП-2»

Модулем нижнего уровня управления является подпрограмма, обеспечивающая связь аппаратного обеспечения с модулем верхнего уровня. Модуль нижнего уровня обеспечивает преобразование сигналов и настройку исполнительных элементов для программного управления с верхнего уровня. Модуль верхнего уровня обеспечивает программное управление, мониторинг и оповещение о состоянии системы посредством мнемосхемы (рис. 4), представленной в виде исполнительных элементов с цветовой индикацией их текущего состояния, сервисное управление которыми осуществляется с помощью сенсорного монитора промышленного компьютера.

В задачи модуля верхнего уровня входят обеспечение ввода-вывода технологических параметров, текущее управление и программирование технологических процессов; обеспечение контроля заданных параметров процесса; получение файла-отчета, его сохранение и архивирование в базе данных процессов; выполнение сервисных операций по техническому обслуживанию ионно-плазменной установки.

Мнемосхема состоит из следующих систем и элементов:

- вакуумная система, включающая в себя форвакуумный насос АВЗ-20Д, высоковакуумный насос НВДМ-6000, вакуумные затворы ВЭП-63 для форвакуумной откачки из высоковакуумного насоса или из рабочего объема установки, затвор ДУ-400 для высоковакуумной откачки из рабочего объема установки, клапаны напуска воздуха в насос АВЗ-20Д и рабочий объем установки, датчики для измерения давления в магистралях откачки и в рабочем объеме установки;

- генератор дуговой металлической плазмы, включающий в себя катод из испаряемого сплава, анод, механизм поджига дуги, электромагнитные катушки катода и анода и регулируемые источники питания дуги и магнитных катушек;

- газовая система, включающая в себя три канала для регулируемой подачи газов, каждый из которых имеет регулятор расхода газа (РРГ);

- газоразрядный источник ионов (с блоком электропитания) холловского типа с замкнутым дрейфом электронов;

- планетарный привод перемещения обрабатываемых деталей;

- система подачи электрического потенциала смещения на покрываемые изделия, состоящая из регулируемого инверторного выпрямителя с жесткой характеристикой и быстродействующего электронного ключа;
- система водяного охлаждения узлов и агрегатов установки.

Для управления исполнительными устройствами и технологическими процессами нанесения покрытий в автоматическом режиме составлены алгоритмы работы.

Алгоритм работы вакуумной системы (рис. 5) ионно-плазменной установки МАП-2 и разработанная на его базе оригинальная управляющая программа обеспечивают работу установки на всех возможных режимах ее работы, определяют условия блокировки устройств, входящих в вакуумную систему установки.

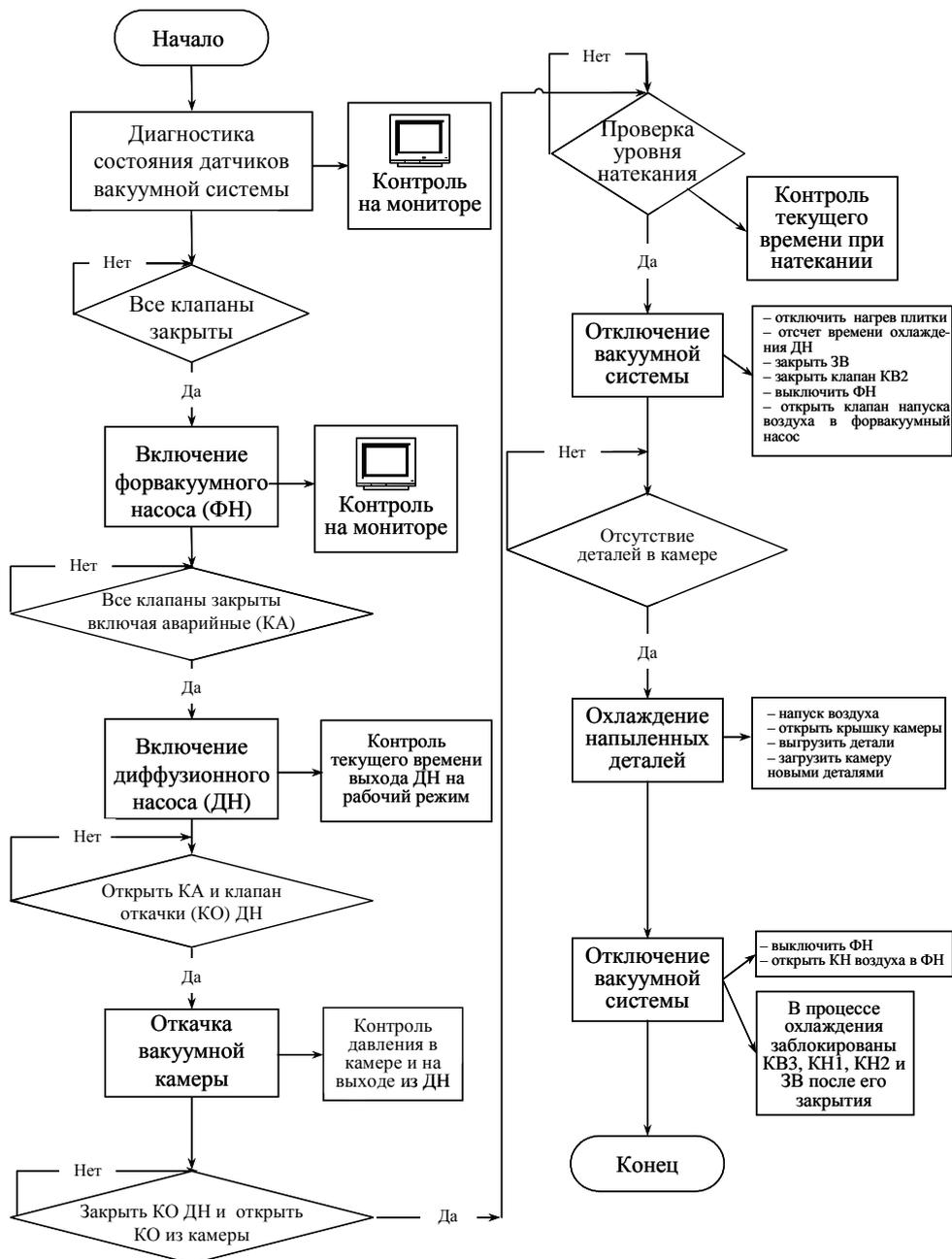


Рис. 5. Алгоритм работы установки МАП-2 для нанесения алюминидного диффузионного покрытия по серийной технологии (КВ – вакуумный клапан; КН – клапан напуска; 3В – высковакумный затвор)

Питание генератора плазмы осуществляется от двух параллельно включенных инверторных выпрямителей типа Sirion 500, имеющих интерфейс для программного управления. Выпрямители обеспечивают устойчивую работу генератора плазмы вакуумной дуги в диапазоне токов 300–750 А и напряжения 30–36 В в зависимости от степени загрузки установки обрабатываемыми деталями. Колебания тока дуги не превышали 2–3% от заданной величины, что значительно лучше, чем в установке МАП-1, в которой система регулирования тиристорного выпрямителя тока ВВН-1200 не обеспечивает заданной точности.

Составлен алгоритм работы газовой системы и газоразрядного источника ионов, определены условия по давлению и расходам для оптимальной работы указанных систем установки МАП-2 в автоматическом режиме. Газовая система установки обеспечивает автономную откачку воздуха или иного газа из магистрали каждого канала и подготовку его к работе, позволяет получать смесь из 2–3 газов любого состава путем определения заданного расхода через РРГ соответствующего канала в диапазоне 1,8–18 литр напуска/ч (1–2 канала) или 3,6–36 литр напуска/ч (3 канал). В газовом смесителе поддерживается избыточное постоянное давление 1 ат, и если расход смеси газов через установку меньше прихода газов через газовые каналы, то избыток газа сбрасывается в вентиляцию посредством клапана сброса. В противном случае пропорционально увеличиваются расходы газов через РРГ каждого канала таким образом, чтобы обеспечить динамическое равенство расхода из смесителя и подачу газов в смеситель. Газоразрядный источник ионов предназначен для «мягкой» ионной очистки обрабатываемой поверхности в установке путем травления поверхности в потоке плазмы ионов аргона от источника, при энергиях ионов от 1500 до 3000 эВ. Применение источника обеспечивает качественное нанесение покрытия на полированные поверхности и исключает при необходимости пескоструйную обработку поверхности при ее подготовке к покрытию.

По сравнению с установкой МАП-1 в новой установке в электрическую схему источника потенциала на покрываемых деталях внесены изменения, позволившие управлять потенциалом смещения в диапазоне 0–300 В, 300–600 В, 600–900 В. Причем регулирование напряжения осуществляется автоматически в диапазоне 0–300 В путем управления трехфазным вариатором напряжения, а при напряжении свыше 300 В напряжение изменяется плавно в двух диапазонах: 300–600 и 600–900 В. Управляющая программа обеспечивает устойчивое управление потенциалом смещения на обрабатываемых деталях от 0 до 900 В.

### **Промышленные ионно-плазменные технологические процессы**

Были отработаны процессы нанесения покрытий из серийных сплавов СДП-2 и ВСДП-11, ионного травления поверхности жаропрочных никелевых сплавов и ионного насыщения в плазме катода из алюминиевого сплава в автоматическом режиме. Алгоритм работы установки МАП-2 при нанесении ионно-плазменных покрытий представлен на рис. 6. Особенностью нанесения ионно-плазменных покрытий является наличие ряда фиксированных условий и значений технологических параметров, которые задаются АСУ ТП установки оператором и контролируются ею в процессе работы: вакуум (не хуже  $2 \cdot 10^{-1}$  Па), уровень натекания в рабочей камере установки, ток вакуумной ду-

ги, напряжение смещения на образцах при очистке ионами металла и нанесении покрытия, продолжительность стадий процесса, выключение систем и агрегатов установки в заданной последовательности и ряд других.

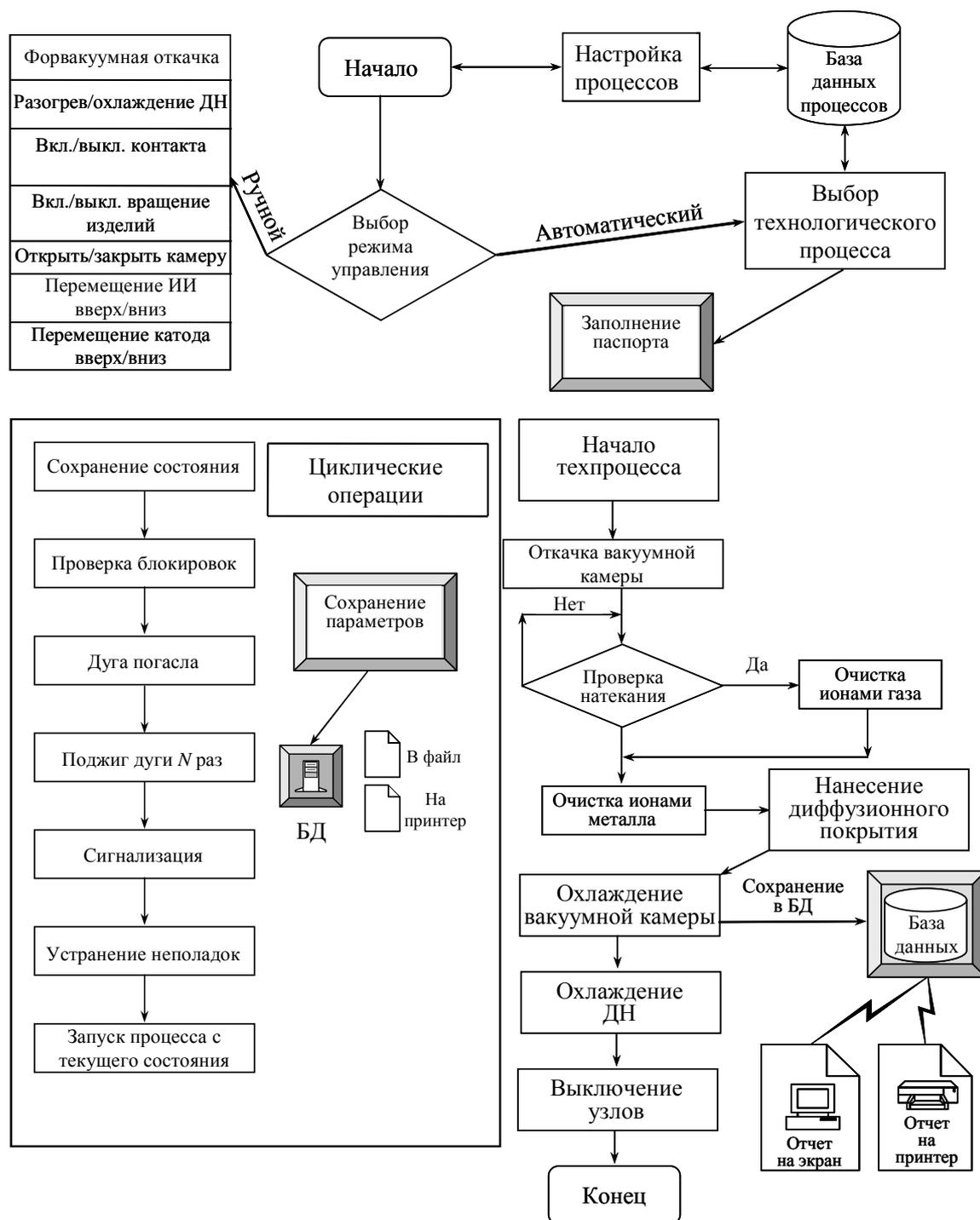


Рис. 6. Алгоритм работы установки МАП-2 для формирования алюминидного диффузионного покрытия (БД – база данных; ДН – диффузионный насос; ИИ – ионный источник)

Проведенные работы позволили разработать автоматизированные технологические процессы нанесения конденсированных, диффузионных и комбинированных покрытий из сплавов СДП-1, СДП-2, СДП-4, СДП-6, ВСДП-9, ВСДП-11, ВСДП-13,

ВСДП-16, ВСДП-18 и т. д. на рабочие лопатки авиационных ГТД. На рис. 7 представлена микроструктура конденсационно-диффузионного покрытия СДП-2+ВСДП-16, полученного на установке МАП-2 в автоматическом режиме. Видно, что на границе ЖС–покрытие полностью отсутствуют какие-либо загрязнения или посторонние включения, характерные для серийных покрытий этого типа, полученных на установке МАП-1. По составу и структуре покрытие полностью соответствует требованиям технической документации.

Место анализа (см. рисунок)	Содержание элементов, % (по массе)									
	Al	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W	Ti	Si	Σ
Основной материал	5,3	9,0	9,8	58,8	0,8	2,1	10,9	2,6	0,9	100,2
Зона 1:										
край образца	22,9	9,8	14,4	50,0	Н/о	Н/о	1,1	Н/о	Н/о	98,2
граница с зоной 2	17,8	16,7	13,7	49,5	Н/о	Н/о	1,2	Н/о	Н/о	98,9
Зона 2	16,8	15,5	13,6	51,8	0,1	0,2	1,4	Н/о	Н/о	99,4
Зона 3:										
граница с зоной 2	9,8	24,4	19,5	44,3	0,1	0,3	1,3	Н/о	Н/о	99,7
граница с металлом (двухфазная зона)	8,6	22,1	17,7	47,7	0,2	0,5	2,7	0,7	0,2	100,1
граница с металлом (однофазная зона)	4,9	23,5	18,1	45,0	0,1	1,1	6,5	0,5	0,6	100,3
металл под покрытием на глубине, мкм:	7,0	9,2	10,6	57,4	0,3	1,5	11,3	1,7	1,1	100,1
20	5,6	9,1	10,2	58,7	0,7	2,0	10,9	2,1	1,0	100,3
50	6,0	8,9	10,3	57,8	0,9	1,9	11,2	2,4	0,8	100,2
100	5,8	8,9	9,8	58,1	1,0	2,1	10,8	2,4	0,9	99,8
150	5,5	9,1	10,0	57,9	0,8	1,9	11,0	2,6	1,1	99,9
200	5,4	9,0	10,1	57,8	1,0	2,0	11,1	2,8	0,8	100,0

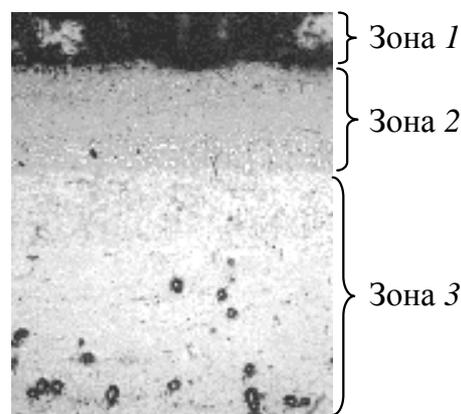


Рис. 7. Микроструктура и элементный состав конденсационно-диффузионного покрытия СДП-2+ВСДП-16 после термической обработки (Н/о – не определяли)

Исследования образцов из сплава ЖС6У с диффузионными покрытиями, полученными по серийной технологии и в режиме ионного насыщения, проводились методами металлографического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 8 представлена зависимость скорости удельного изменения массы образца от напряжения смещения. С ростом напряжения растет температура обрабатываемой поверхности, что приводит к изменению ее фазового состава, – изломы на кривой в области напряжения 150, 200 и 400–800 В. Результаты анализа фазового состава поверхностного слоя сплава ЖС6У в зависимости от напряжения смещения приведены в табл. 1. После ионного насыщения диффузионные слои, сформированные при напряжениях 400–800 В, представляют собой β-фазу (NiAl); при 180–300 В – δ-фазу (Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>); при напряжении 100 В и менее – соединения с более высоким содержанием алюминия вплоть до твердого раствора на его основе.

При напряжении смещения в диапазонах 180–400 и 600–800 В концентрация Al в поверхностном слое составляет соответственно 29,1–32,5 и 15,8–16,5%. Увеличение времени формирования диффузионного слоя при напряжении смещения 600 В в 2 раза увеличивает концентрацию Al в поверхностном слое до 53,2%. Снижение концентрации Al непосредственно под насыщенным слоем вплоть до уровня концентрации в материале основы объясняется формированием слоев переменного состава вследствие металлотермических реакций и встречной диффузии элементов покрытия и подложки.

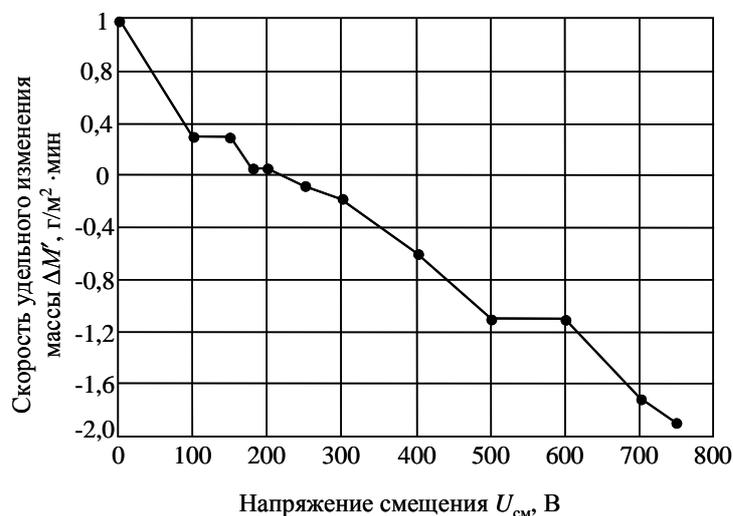


Рис. 8. Зависимость скорости удельного изменения массы образца от напряжения смещения

Таблица 1

#### Фазовый состав поверхностного слоя после обработки в плазме сплава ВСДП-11

Напряжение смещения, В	Фазовый состав
Без покрытия (в исходном состоянии)	$\gamma$ -Ni <sub>3</sub> Al + (Nb, Ti)C
0	$\alpha$ -Al
100	NiAl <sub>3</sub>
180	Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> + NiAl <sub>3</sub> (следы) + Ni <sub>3</sub> Al (следы)
200	Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> + NiAl <sub>3</sub> (следы) + Ni <sub>3</sub> Al (следы)
250	Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>
300	Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>
400	$\beta$ -NiAl + Al <sub>2</sub> Y + Ni <sub>3</sub> Al (следы)
500	$\beta$ -NiAl + Si <sub>2</sub> Y + Al <sub>2</sub> Y
600	$\beta$ -NiAl + Al <sub>2</sub> Y
700	$\beta$ -NiAl + NiAl <sub>3</sub> (следы) + Al <sub>2</sub> Y
750	$\beta$ -NiAl + Al <sub>2</sub> Y (следы)
800	$\beta$ -NiAl

В работе исследован процесс ионного травления поверхности ЖС в плазме вакуумного дугового разряда. Для генерации плазмы использовались катоды из технически чистых хрома, алюминия, титана и никелевых сплавов: Ni–20%Cr и СДП-2 (Ni–20% Cr–12% Al–0,3% Y).

По изменению массы образцов после ионного травления рассчитаны средние значения скорости травления некоторых ЖС (табл. 2 и 3).

## Скорость травления жаропрочных сплавов в плазме хрома, алюминия и титана

Жаропрочный сплав	Скорость травления, мкм/ч, при напряжении на подложке 500 В/ 700 В, в плазме металлов		
	Cr	Al	Ti
ЖС6У	6,3/9,1	8,3/12,8	10,6/18,8
ЖС26	7,2/5,7	7,9/10,2	9,5/17,7
ЖС32	7,6/5,6	8,1/12,2	9,6/18,5

Таблица 3

## Скорость травления жаропрочных сплавов в плазме никелевых сплавов

Напряжение на подложке, В	Скорость травления*, мкм/ч, сплава подложки		
	ЖС6У	ЖС32	ЖС26
300	0,52/–	0,32/–	0,8/–
500	8,0/12,4	6,7/7,08	7,2/–
700	20,9/27,1	10,2/14,2	10,3/14,1
800	26,9/30,6	14,9/16,9	–/–

\* В числителе – в плазме сплава СДП-2, в знаменателе – нихрома.

Представленные данные показывают, что величина скорости травления зависит от материала подложки. Наибольшие значения скорости травления получены для образцов из сплава ЖС6У, наименьшие – для образцов из сплава ЖС32. Величина скорости травления для всех сплавов возрастает с ростом отрицательного потенциала подложки. Существенное влияние на скорость травления оказывают температура подложки, которая возрастает с ростом потенциала смещения, и состав катода вакуумной дуги. Скорость травления жаропрочных сплавов в плазме многокомпонентных сплавов заметно выше скорости травления в плазме чистых металлов (хрома, алюминия и титана), что связано с одновременным ионным насыщением поверхности ЖС этими элементами, которое было рассмотрено выше на примере алюминия (см. табл. 1).

В результате проведенных работ разработаны автоматизированные процессы формирования защитных и упрочняющих ионно-плазменных покрытий для лопаток компрессора и турбины ГТД.

Исследования технологических процессов формирования ионно-плазменных покрытий показали, что установка МАП-2 с АСУ ТП обеспечивает:

- точность нанесения по толщине и элементному составу на уровне 2–2,5%;
- воспроизводимость параметров технологического процесса, что является важным фактором в условиях серийного промышленного производства;
- повторяемость в результате сохранения, документирования и архивирования данных технологического процесса с использованием ленточной базы данных процессов;
- безопасность технологического цикла вследствие использования современного бесперебойного электрооборудования, исключающего человеческий фактор и факторы внешнего воздействия на систему.

Представленные современные подходы в области разработки промышленных автоматизированных технологических процессов формирования ионно-плазменных покрытий на установке МАП-2 с АСУ ТП показывают целесообразность автоматизации как отдельных исполнительных устройств, так и технологии в целом. Достигнутые

в работе результаты отвечают высоким требованиям, предъявляемым к качеству, ресурсу и надежности защитных ионно-плазменных покрытий для лопаток авиационных ГТД, и обеспечивают их конкурентоспособность и рентабельность, что подтверждено в условиях промышленного серийного производства (ФГУП ММПП «Салют» и др.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полетика И.М., Борисов М.Д., Краев Г.В., Вайсман А.Ф., Голковский М.Г. Особенности формирования структуры и свойства поверхностного слоя стали при облучении пучком релятивистских электронов //МиТОМ, 1997, №4, с. 13–16.
2. Клименов В.А., Иванов Ю.Ф., Первалова О.Б., Проскуровский Д.И. и др. Формирование структуры и механизмы упрочнения поверхностных слоев нержавеющей стали, обработанных низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком //ФХОМ, 2001, №2, с. 41–47.
3. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения //Авиационная промышленность, 1995, №7–8, с. 44–48.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении, 1999, №2, с. 42–47.
5. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Современные процессы ионной обработки поверхности в плазме вакуумного дугового разряда //В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных ГТД и прогрессивные технологии их производства.– М.: ВИАМ, 2003, с. 132 –142.

УДК 620.197

*С.А. Будиновский, С.А. Мубояджян*

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРОЦЕССОВ УДАЛЕНИЯ ОТРАБОТАННЫХ  
ЖАРОСТОЙКИХ АЛЮМИНИДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОВЕРХНОСТИ  
ПЕРА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

Высокая стоимость современных жаропрочных литейных никелевых сплавов и сложность технологических процессов изготовления охлаждаемых рабочих лопаток турбин с направленной или монокристаллической структурой делают все более актуальным вопрос продления срока их службы с помощью ремонта. Для проведения ремонта лопатки, необходимо удалить с ее поверхности остатки жаростойкого алюминидного покрытия, которое в процессе эксплуатации утрачивает свои защитные свойства из-за обеднения слоя покрытия алюминием или появления трещин. Изменения состава покрытия или его повреждения, как правило, неравномерны по высоте и контуру профильной части лопатки из-за неоднородности температур и напряжений, воздействующих на поверхность пера в процессе эксплуатации. Покрытие необходимо удалить, так как для восстановления оптимальной (гарантирующей необходимую прочность) структуры жаропрочного сплава (ЖС) лопатки при ремонте целесообразно проводить