

конкретного двигателя осуществляется с применением математической модели путем реализации целевой функции вида

$$\Phi(n_o, \Delta G_T) = \max \{(\tau_o - \tau_{\eta_k}) + (\tau_{\eta_T} - \tau_o)\};$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \eta_k^*} > 0; \quad \frac{\partial \tau}{\partial \eta_T^*} < 0, \quad (9)$$

где  $\tau_o$  — значение времени приемистости, соответствующее исправному состоянию;  $\tau_{\eta_k}, \tau_{\eta_T}$  — соответственно значения времени приемистости при дефектах компрессора и турбины. Варьируемыми параметрами являются: начальное значение частоты вращения ротора двигателя  $n_o$  и количество подаваемого топлива  $\Delta G_T$ . Результаты исследований показали, что информативность диагностического параметра  $\tau$  максимальна при законе подачи топлива, близком к скачкообразному и являющемся только функцией времени, т. е.  $G_T = f(t)$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с.
2. Адгамов Р. И., Боровик В. О., Дмитриев С. В. и др. Обработка и анализ информации при автома-

тизированных испытаниях ГТД. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.

3. Черкасов Б. А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1988. 360 с.
4. Гишваров А. С., Приб И. В. Оценка технического состояния двигателей в условиях ограниченной информации по термодинамическим параметрам // Сб. науч. тр. ЦАГИ. М., 2001.
5. Гишваров А. С., Приб И. В. Оценка технического состояния энергетических установок по параметрам переходных процессов // Технологические проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. науч. тр. АН РБ. Уфа: Гилем, 2001. С. 162–163.

#### ОБ АВТОРЕ



**Приб Игорь Викторович**, аспирант каф. авиационных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 2001). Готовит диссертацию в области надежности и диагностики технических систем.

УДК 621.793

Н. А. СУХОВА

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТВЕРДЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕТАЛЛОГРАФИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассматривается разработка вакуумной ионно-плазменной технологии синтеза высокотвердых поверхностных слоев методом осаждения потоков углеродной плазмы, генерируемой вакуумно-дуговым источником с графито-кремниевым катодом. Фуллерены; алмазоподобные пленки; ионно-плазменные технологии

#### ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой машиностроения (в частности, авиационного) является повышение надежности и долговечности узлов и механизмов. Решение этой задачи тесно связано с созданием новых конструкционных материалов со специфическими физико-механическими свойствами, обеспечивающими повышение эксплуатационных характеристик изделий. Учитывая, что в большинстве случаев разрушение деталей начинается с поверхности, как, например, при трении, коррозионных процессах и др., одним из путей повышения срока службы изделий является модификация свойств поверхности уже существующих конструкционных материалов. Из множества методов упрочняющих технологий наибольшее распространение получили технологии вакуумно-плазменного физического (PVD) и химического (CVD) нанесения износостойких по-

крытий. Наибольшее внимание уделяется вакуумным ионно-плазменным технологиям, вследствие практически полной универсальности технологического процесса, высокой скорости нанесения покрытий, высокой воспроизводимости параметров на каждой операции и практически полного отсутствия экологических проблем, а также возможности получения поверхностных слоев со специальными физико-механическими свойствами.

#### 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТВЕРДЫХ ПОКРЫТИЙ

Уникальные свойства покрытий на основе углерода в различных модификациях от графитоподобных до алмазоподобных и алмазных представляют интерес в процессе решения задач современного машиностроения. Применение термина «алмазоподобные пленки» не связано с образованием монокристаллов алмаза, но отражает тот

факт, что рентгеновский снимок полученных пленок подобен алмазному и указывает на упорядоченную структуру в пределах  $50...10 \text{ \AA}$ . Возможность управления свойствами пленок при изменении условий осаждения делает их перспективными для практического применения — от защитных износостойких покрытий до поверхностных слоев с минимальным коэффициентом трения. Проблема получения данного вида поверхностных слоев может быть решена следующими путями. Во-первых, в свете открытия фуллеренов рассматривается возможность повышения износостойкости деталей, выполненных из конструкционных материалов, путем создания в поверхности слоя, содержащего кристаллы фуллеренов.

Наиболее эффективный способ получения фуллеренов основан на термическом разложении графита. (Например, электродуговое испарение, испарение графита при помощи импульсных лазеров) [1, 2]. При оптимальных условиях генерации молекул фуллеренов нагревание графита должно быть умеренным, в результате чего продукты его распада будут состоять из фрагментов, являющихся элементами структуры молекул фуллерена. При этом разрушаются связи между отдельными слоями графита, но не происходит разложения испаряемого углерода на отдельные атомы. При этих условиях испаряемый графит состоит из фрагментов, включающих шестиугольные конфигурации атомов углерода. Из этих фрагментов и происходит сборка молекулы  $C_{60}$  и других фуллеренов.

Однако перечисленные выше способы получения пленочных систем фуллеренов — металл обладают рядом недостатков: для создания температуры порядка  $3500^\circ \text{C}$ , необходимой для испарения графита, требуются высокие энергетические затраты; все классические способы синтеза фуллеренов основаны на локальном по площади энергетическом воздействии на сырье.

Во-вторых, особый интерес вызывают алмазоподобные углеродные пленки, легированные кремнием [3, 4]. Это обусловлено возможностью изменения их свойств и перспективой синтеза соединения, которое должно обладать, как предсказывает теория, уникальными механическими свойствами, и замены дорогостоящих синтетических алмазов, применяемых в различных средствах обработки материалов (резцы, сверла и т. д.), на покрытия из графитоподобных и алмазоподобных пленок, получаемых из газовой фазы как более доступные и дешевые.

В силу указанных причин изучение вопроса получения высокотвердых покрытий на конструкционные материалы является достаточно насущной проблемой.

## 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОСАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТВЕРДОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА И КОМПОЗИЦИИ УГЛЕРОД-МЕТАЛЛ

Для осаждения покрытий с высокими механическими свойствами (твердость, износостойкость

и т. д.) был разработан технологический процесс осаждения покрытий применительно к промышленной установке ННВ 6,6-И1, который включает в себя:

- предварительную подготовку поверхности;
- ионную очистку поверхности;
- нанесение покрытия на основе углерода.

Схема установки ННВ 6,6-И1, модернизированной для нанесения высокотвердых покрытий на основе углерода и композиции углерод-металл, представлена на рис. 1.

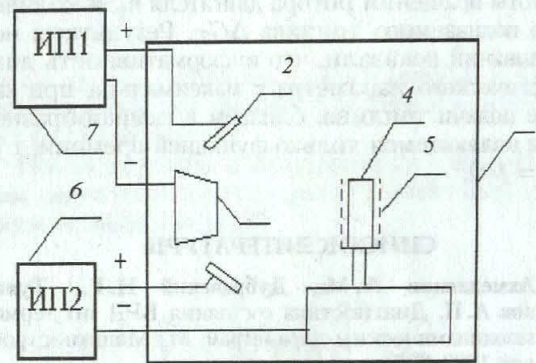


Рис. 1. Схема установки ННВ 6,6-И1, модернизированной для нанесения высокотвердых покрытий на основе углерода: 1 — вакуумная камера; 2 — анод; 3 — охлаждаемый катод; 4 — изделие; 5 — экран; 6 — источник питания тлеющего разряда; 7 — источник питания

Предварительная подготовка поверхности (химическая очистка) — удаление с поверхности видимых слоев органических загрязнений: остатков масел, смазочных материалов, отпечатков пальцев и жировых пятен. Используются органические растворители: этиловый спирт, ацетон. В особо ответственных случаях очистку проводят в ультразвуковых ваннах.

Следующий этап технологического процесса составляет ионная очистка, которая проводится на промышленной установке ННВ 6,6-И1, модернизированной для нанесения высокотвердых покрытий.

Установка предназначена для нанесения упрочняющих одно- и многослойных покрытий на детали диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм способом конденсации вещества с ионной бомбардировкой.

Процесс нанесения покрытий основан на сильноточном разряде, горящем в парах материала электродов (катодная форма вакуумной дуги). Основную часть разрядного напряжения составляет катодное падение потенциала, определяемое в основном видом материала катода. Минимальный ток разряда определяется его устойчивостью, а максимальный — эффектом пинчевания. Пары металла образуются в результате испарения материала катода из области катодных микропятен, хаотически перемещающихся по интеграль-

но-холодной поверхности электрода. Степень ионизации продуктов эрозии в зависимости от материала катода меняется в диапазоне 10–90%, а средняя степень струй составляет около  $10^4$  м/с.

Плазменный ускоритель служит для генерации металлической плазмы, предварительного ускорения ионов и частичной сепарации капельной фазы. Плазменный ускоритель конструктивно состоит из торцевого катода (из напыляемого материала) и кольцевого анода и представляет собой торцевой холловский ускоритель с развитым анодом. Катод и анод имеют принудительную систему охлаждения водой и установлены в герметичный корпус, на котором имеется соленоид. Поджиг дуги осуществляется путем искрового пробоя воздушного промежутка и загорания дуги в парах испаряемого материала катода.

Ионная очистка поверхности проводится в атмосфере инертного газа аргона (Ar) и без подачи в рабочую камеру газа при давлении  $10^{-3}$  Па. Напряжение на подложке не менее 1100 В при токе дуги 50 А, длительность обработки 1–2 минуты.

Очистка поверхности ионами материала катода разрушает структуру поверхности и приводит к высокой концентрации дефектов поверхностного слоя. В процессе ионной очистки высокой энергии подложка сильно нагревается и может привести к перегреву и оплавлению обрабатываемой поверхности, изменению геометрических размеров (для тонкостенных деталей). Проведение очистки планируется для предварительного подогрева подложки перед нанесением покрытий.

Следующей стадией технологического процесса является нанесение покрытий на основе углерода. Нанесение покрытий производится при давлении в камере 0,133 Па, потенциале на подложке 50–120 В и при токе дуги 50 А. Время осаждения покрытий зависит от необходимой толщины защитного слоя (толщина покрытий  $t = 40$  мкм). Напыление покрытий производилось в среде реактивных газов.

В процессе осаждения покрытий подложка равномерно вращается вокруг своей оси вместе с приспособлением с закрепленной на нем обрабатываемой деталью.

Контроль толщины покрытия осуществляется по приращению массы образцов в процессе ее покрытия путем взвешивания, что гарантирует толщину защитного слоя по всей поверхности.

При внешнем осмотре деталей на покрываемой поверхности не допускаются сколы, трещины, вспучивания и отслоение покрытия.

Исходным объектом для анализа технологических возможностей интегрально-холодных катодов, выполненных из углеродсодержащего материала с кремнием, являлся экран, установленный в вакуумной камере на некотором расстоянии от электродугового испарителя нормально к потоку плазмы.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАТОДОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА И КОМПОЗИЦИИ УГЛЕРОД-МЕТАЛЛ

Результаты испытаний по выявлению технологических характеристик используемых катодов на основе графита приведены на рис. 2–5.

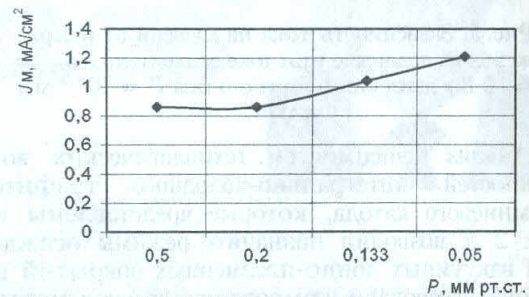


Рис. 2. Зависимость тока на мишени от давления инертного газа при напряжении смещения  $U = 50$  В и токе дуги 50 А

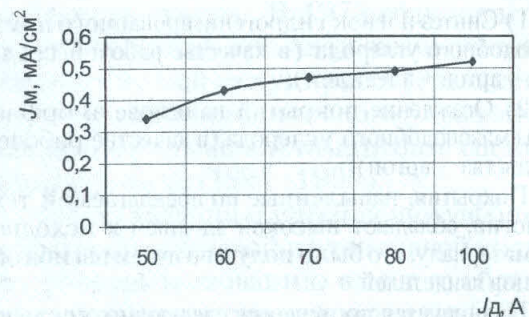


Рис. 3. Зависимость тока на мишени от тока дуги при напряжении смещения  $U = 50$  В и давлении инертного газа  $P = 10^{-3}$  мм рт. ст.

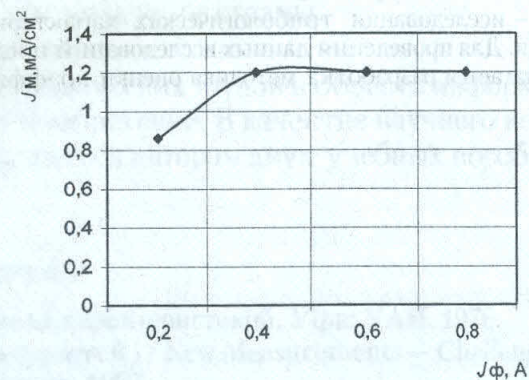


Рис. 4. Зависимость тока на мишени от тока фокусировки при токе испарителя  $J_{\text{исп}} = 50$  В и давлении инертного газа  $P = 10^{-3}$  мм рт. ст.

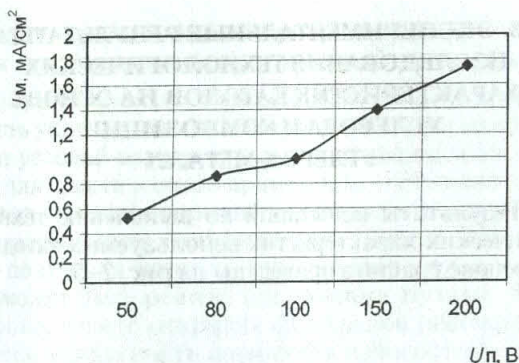


Рис. 5. Зависимость тока на мишени от напряжения на подложке при токе испарителя  $J_{исп} = 50$  В и давлении инертного газа  $P = 10^{-3}$  мм рт. ст.

Анализ зависимостей технологических возможностей интегрально-холодного графитокремнивого катода, которые представлены на рис. 2–5, позволил назначить режимы осаждения вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе углерода и композиции углерод-металл и разработать технологию нанесения покрытий, физико-механические характеристики которых могут приближаться к значениям, свойственным алмазу.

Обработка осуществлялась по двум направлениям:

- 1) Синтез пленок гидрогенизированного алмазоподобного углерода (в качестве рабочей среды газ – аргон + ацетилен);
- 2) Осаждение покрытий на основе аморфного алмазоподобного углерода (в качестве рабочей среды газ – аргон).

Покрытия, напыленные по предлагаемой технологии, обладают высокой адгезией к исходному материалу, что было получено путем изгиба образцов свидетелей.

Планируется проведение следующих исследований:

- количественная оценка содержания фуллеренов в поверхностном слое (ИК-спектроскопия, масс-спектроскопия);
- исследование износостойкости графитокремниевых покрытий;
- исследования трибологических характеристик. Для проведения данных исследований предполагается разработка методики оценки коэффи-

циента трения образцов с покрытием с целью оптимизации технологии получения покрытий.

## ВЫВОДЫ

Анализ вакуумно-плазменных методов осаждения покрытий позволил сформулировать следующее утверждение: наиболее перспективным для получения высокотвердых поверхностных слоев с регулируемыми в широких пределах свойствами представляется использование плазменных источников с вакуумно-дуговым разрядом, развивающимся в парах интегрально холодного катода на основе углерода и композиции углерод-металл.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев Д., Блинов И., Богданов А. Р.** Образование фуллеренов в дуговом разряде // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. № 2. С. 76–90.
2. **Шехтман С. Р., Сухова Н. А.** Использование методов вакуумной ионно-плазменной обработки с целью получения высокотвердых поверхностных слоев на основе фуллеренов // Научно-технические труды машиностроения: Сб. тр. Уфа: Гилем, 2000. С. 102–106.
3. **Шемченко Е. И., Шалаев Р. В., Пашинская Е. Г.** Исследование и разработка технологии нанесения жаростойких покрытий на лопатки. Исследование характеристик алмазоподобных пленок как сверхтвердых покрытий // Алмазоподобные и углеродные пленки. 2001. С. 146–147.
4. **Аксенов И. И., Стрельницкий В. Е.** Синтез безводородных пленок алмазоподобного углерода // Алмазоподобные и углеродные пленки. 2001. С. 96–105.

## ОБ АВТОРЕ



**Сухова Надежда Александровна**, аспирант кафедры технологии машиностроения УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1995). Готовит диссертацию по вакуумным ионно-плазменным методам модифицирования поверхности.