

Рассмотренная выше ситуация без труда обобщается на случай, когда тело находится на $i > 2$ участках с известными координатами концов и с коэффициентами трения μ_i , а также на случай, когда упругие характеристики участков с различными коэффициентами трения различны. Представляет интерес обобщение рассмотренной модели для ситуации со случайно распределенным коэффициентом трения, а также для ситуации с плоскопараллельным движением твердого тела – к этому классу задач принадлежит задача определения движения автомобиля при наличии заноса с учетом эффекта скатывания материала колес.

УДК 539.216:535.36

Каролинский В.Г., Пекун А.И., Луковский С.В., Сазонов М.И., Хвисевич В.М.

ПОЛУЧЕНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ (ВПУ-2)

Анализ научно-технической и патентной информации [1-2] показывает, что в последнее время учеными различных стран интенсивно ведутся исследования по выращиванию алмазоподобных и алмазных пленок (АП), а также разрабатываются соответствующие технологии нанесения таких пленок на детали машин, инструмент, пресс-формы, оптические детали и т.д. Потенциальные возможности использования АП в различных областях науки и техники основаны на уникальных свойствах алмаза: высокая теплопроводность, химическая инертность, низкий коэффициент трения, высочайшая твердость и т.д.

На рисунке 1 приведена фотография плазменно-вакуумной установки (ВПУ-2) предназначенной для получения алмазоподобных пленок, которая разработана Брестским политехническим институтом совместно со Сморгонским заводом оптического станкостроения.

Установка предназначена для нанесения тонких износостойких алмазоподобных покрытий способом химического осаждения из газовой фазы с применением высокотемпературной плазменной струи.

В состав установки входят:

- высокоэнтальпийный плазматрон мощностью 60 кВт;
- откачной пост;
- система подачи газа в рабочую камеру и плазматрон;
- пульт управления.

Технические характеристики установки приведены в таблице 1.

Относительной особенностью данной установки в сравнении с аналогами является применение мощного плазматрона постоянного тока с межэлектродной вставкой (МЭВ) и газовой завесой стенок разрядной камеры, генерирующего сверхзвуковую струю аргона мощностью до 60 кВт.

Разработанный плазматрон с МЭВ (рис. 2) состоит из внутреннего кольцевого электрода – катода 1, выходного электрода – анода 2, между которыми устанавливается секционированная межэлектродная вставка. МЭВ набрана из интенсивно охлаждаемых водой электрически изолированных друг от друга медных секций – шайб 3 с цилиндрическими отверстиями диаметром 4-10 мм. Для обеспечения стабильно-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. С.В.Босаков. К устойчивости стержней на упругом основании/ Весті АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1994. №1. - С.29-33.
2. А.Н.Прокопеня, Н.И.Чопчиц, Р.Краглер. Анализ одномерного движения протяженного тела по поверхности с переменным коэффициентом трения/ Тезисы докл. междунар. математич. конф. «Дифференциальные уравнения и системы компьютерной алгебры» (19-22 сент. 2000 г., Брест). Брест, БрГУ, 2000. С.60.

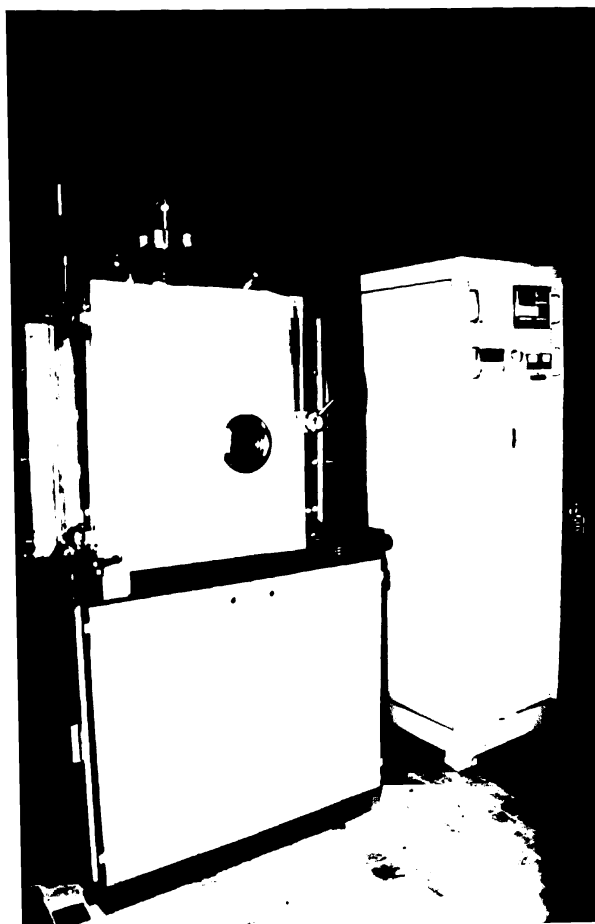


Рисунок 1. Плазменно-вакуумная установка (ВПУ-2)

го горения дуги на оси электроразрядной камеры и исключения шунтирования дуги в канале плазматрона толщина сек-

Каролинский Владимир Григорьевич. К.п.н, доцент каф. физики Брестского государственного технического университета.
Пекун Александр Иванович. Инженер, научный сотрудник каф. СМиТМ Брестского государственного технического университета.
Луковский Сергей Викторович. Инженер, аспирант каф. СМиТМ Брестского государственного технического университета.
Сазонов Михаил Иванович. Д.т.н., профессор каф. СМиТМ Брестского государственного технического университета.
Хвисевич Виталий Михайлович. К.т.н., зав. каф. СМиТМ Брестского государственного технического университета.
 Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.

Технические характеристики установки

Максимальная мощность, потребляемая установкой, кВт	65
Рабочее давление в камере, Па	300...2000
Время достижения давления 0.1Па, необходимого для ионной очистки, мин	15
Диаметр рабочей камеры, мм	700
Высота рабочей камеры, мм	700
Масса установки, кг	1550
Число плазмотронов, шт.	1
Расход аргона, л/мин	6...40
Расход водорода, л/мин	1...12
Расход ацетилена или метана, л/мин	0,1...1,4
Расход охлаждающей воды, л/час	800
Скорость роста пленки, мкм/ч	не менее 20

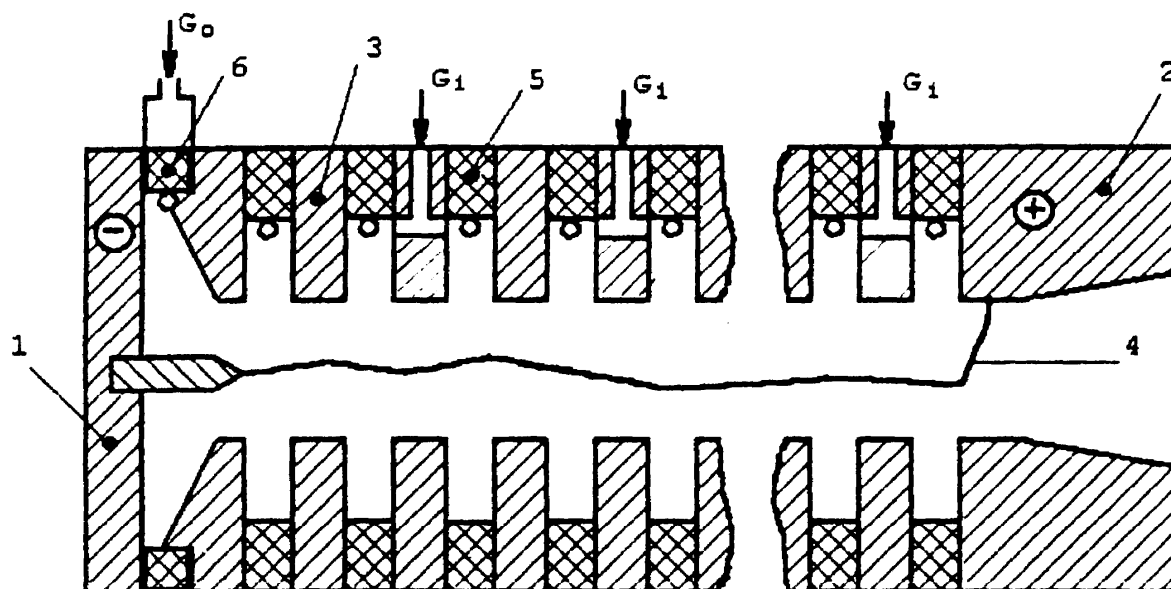


Рисунок 2 Принципиальная схема плазмотрона с МЭВ

1 - катод, 2 - анод, 3 - секции МЭВ, 4 - дуга, 5 - изолятор, 6 - кольцо закрутки потока рабочего газа, G_0 - основная подача газа, G_i - дополнительная подача газа для организации газовой завесы стенок разрядной камеры.

ций выбирается такой, чтобы падение потенциала на участке дуги внутри секции не превышало суммарную величину анодного и катодного падений потенциалов.

С целью увеличения ресурса работы катода при нагреве аргона в плазмотроне применен внутренний электрод из тугоплавкого материала в виде вольфрамового стержня диаметром 3-4 мм, который запрессован в медную обойму и выступает из нее на 10-20 мм. Проведенные длительные испытания плазмотрона при токах дуги 50-320 А и работе его вместе с вакуумной камерой и осаждении алмазоподобных пленок показали, что ресурс разработанного катода составляет не менее 50-60 часов.

С целью генерации сверхзвуковой плазменной струи анод в разработанной конструкции плазмотрона выполнен в виде конического сопла с углом раскрытия 14° , причем, его входная часть, протяженностью 1, 5-2 калибра, изготовлена в виде цилиндра диаметром 4-10 мм.

Электроизоляция между секциями МЭВ и электродами обеспечивается прокладками 5 из вакуумной резины. Рабочий газ - аргон с расходом $G = 6 - 28$ л/мин подается через

кольцо закрутки. Для организации газовой завесы стенок канала с целью снижения тепловых потерь в секции и устойчивого горения дуги на переходном участке течения начиная с четвертой секции от катода в щели между секциями подается рабочий газ с расходом $G = 0 - 0,3$ л/мин в каждую щель.

Диаметр электроразрядной камеры и сопла плазмотрона может составлять 4; 6; 8 или 10 мм. Число секций МЭВ также может изменяться от 3 до 24. Это позволяет заранее определить необходимую эксплуатационную мощность плазмотрона.

Исследования показали, что вольт-амперные характеристики плазмотрона с МЭВ являются восходящими при отношении тока к диаметру канала электроразрядной камеры более 30. Это позволяет использовать стандартные силовые источники питания плазмотрона с жесткой характеристикой.

Схема реактора установки ВПУ-2, используемого для осаждения алмазоподобных пленок, приведена на рисунке 3. Плазмотрон (1) позволяет генерировать плазменную аргоновую струю с дозвуковым или сверхзвуковым истечением (рис. 1). Введение реагентов в такую струю и разрядную камеру

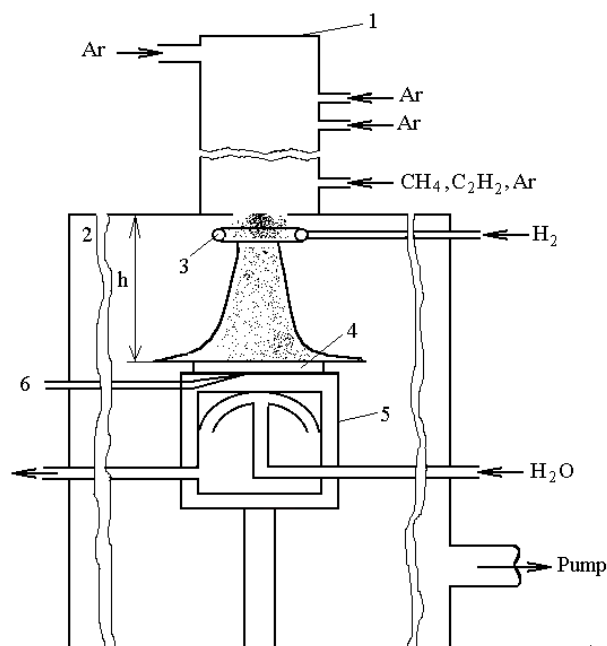


Рисунок 3. Схема реактора установки ВПУ-2

1 - плазмотрон с МЭВ; 2 - химический реактор; 3 - кольцо для подачи газов в реактор, 4 - подложка, 5 - водоохлаждаемый подложкодержатель, 6 - термопара.

плазмотрона позволяет изменять процесс роста алмазоподобных пленок CDV методом. Химические реагенты (H_2 , C_2H_2 , CH_4) могут инжектироваться в плазменную струю как через отверстия в кольцевой трубке 3, так и через секции в разрядную камеру плазмотрона. Площадь осаждения пленки может изменяться как изменением расстояния h между плазмотроном и подложкой 4, так и изменением конфигурации выходного канала анода-сопла. Осаждение пленок можно производить на различные подложки (молибден, медь, сталь и т.д.), которые прижимаются к водоохлаждаемому подложкодержателю 5. Температура подложки может регулироваться как расходом воды, так и мощностью плазмотрона. Контроль температуры осуществляется термопарой 6.

Таким образом, как вытекает из вышесказанного, установка типа ВПУ-2 позволяет в широких диапазонах изменять параметры ее работы, что, в конечном итоге, влияет на качество и скорость роста алмазоподобных пленок.

В настоящее время в БГТУ проводятся исследования по осаждению алмазоподобных пленок на подложки и инструменты из различных материалов при различных отношениях расхода Ar , H_2 , CH_4 , C_2H_2 .

Осаждение пленок проводилось при мощности плазмотрона 5-20 кВт, расходах аргона 3-6 л/мин, метана 0,3-2 л/мин, водорода 0,4-1,2 л/мин, расстояниях от плазмотрона до подложки 40-120 мм, давлении газа в реакторе 150-280 Па. В частности, осаждение пленок производилось на режущие пластины типа ТВК. Практические эксперименты показали, что ресурс работы таких пластин увеличился в 4-5 раз. В качестве основного метода исследования структуры покрытий нами был выбран метод комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС регистрировались при комнатной температуре с помощью спектрометра модели 1403 фирмы Spex. Регистрация спектров осуществлялась по схеме обратного рассеяния, спектральная полуширина щелей спектрометра составляла 2-3 cm^{-1} . Возбуждение производилось излучением Ar^* лазера с длиной волны 488 нм и 514,5 нм. Мощность

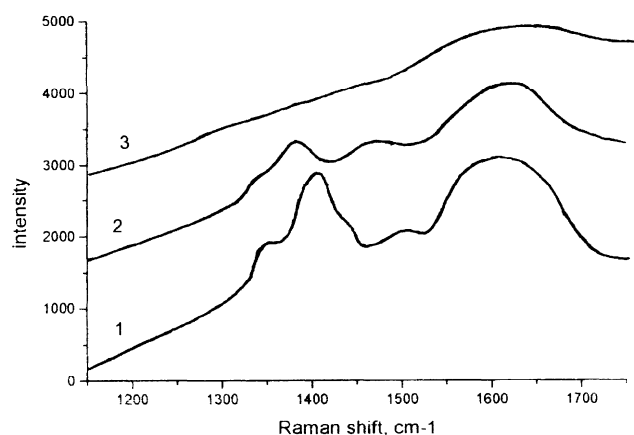


Рисунок 4. Спектры КРС углеродных пленок, выращенных с использованием медных столиков различной толщины (во всех экспериментах расход метана был 0,2 л/час);

- 1 - Толщина столика 4 мм, время нанесения 60 мин (пленка №166);
- 2 - Толщина столика 2мм, время нанесения 15 мин (пленка №137);
- 3 - Без столика, время нанесения 20 мин (пленка №153).

излучения на образце составляла 0,3-0,4 Вт, а диаметр возбуждающего пучка составлял ~ 20 нм.

Характерный спектр КРС углеродных пленок, выращенных при различных температурах подложки и времени напыления показан на рисунке 4

На рисунке 4 показано изменение характера спектров КРС углеродных пленок в зависимости от толщины водоохлаждаемого столика при прочих равных условиях нанесения. Температура на поверхности подложки увеличивается с ростом толщины столика. Спектр КРС пленки, выращенной при максимальной температуре (~650⁰ C), состоит из двух широких полос 1350 cm^{-1} (D -полоса) и 1580 cm^{-1} (G -полоса) с одинаковой интенсивностью, что позволяет характеризовать ее как алмазоподобную. При снижении температуры на поверхности подложки соотношение интенсивностей D - и G -полос уменьшается. Кроме полосы 1350 cm^{-1} наблюдаются дополнительные полосы (кривая 1) с максимумами в интервале 1370-1400 cm^{-1} и 1470-1500 cm^{-1} . Причем интенсивность полосы 1370-1400 cm^{-1} превосходит интенсивность D -полосы. Снижение интенсивности и уширение полос D - и G -полос, а также появление в промежуточной области между двумя основными полосами дополнительных полос говорит об уменьшении размеров как sp_3 -, так и sp_2 -гибридизированных кристаллических кластеров. Это уменьшение размера кристаллических кластеров прежде всего может происходить за счет изменения температуры подложки.

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Установка ВПУ-2 позволяет в широких диапазонах регулировать скорость и качество роста алмазоподобных пленок CVD-методом.
2. Осажденные алмазоподобные пленки на режущий инструмент позволяют увеличивать их износостойкость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Л.М.Блинов, Ю.В.Гуляев, А.В.Долголаптев, И.П.Шклов. Алмазные пленки: перспективные направления использования и их получение в плазме ВЧ- и СВЧ- разрядов по-

ниженного и атмосферного давления. // Радиотехника и электроника, 1996г., том 41, №4, стр. 389-403.
 2. V.G.Perevezev, V.I.Konov, V.G.Ralchenko, A.S.Pozharov, S.Metev, H.Btecht, G.Sepold. Parametric studies of diamond

film deposition by dc arc-jet technique// Proceedings of 4th International Symposium on Diamond Films and Related Materials. Kharkov, Ukraine, September 20-22,1999, p. 110-113.

УДК 517.948.34

Пархимович И.В.

О ВЕЗДЕ РАЗРЕШИМЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Рассмотрим краевую задачу для линейного интегро-дифференциального (и.-д.) уравнения

$$T_1 u: \begin{cases} Tu \equiv \dot{u}(x) + P(x)u(x) + \int_0^{x^\alpha} K(x,s)\dot{u}(s)ds = f(x) \\ u(0) - \int_0^1 M(x)\dot{u}(x)dx = 0 \end{cases} \quad (1)$$

в которой предполагается:

- действительная n -вектор-функция $u(x)$ действительного переменного x принадлежит линейалу $D_2^n[0,1]$ абсолютно непрерывных n -вектор-функций, производная которой $\dot{u}(x) \in L_2^n[0,1]$; n -вектор-функция $f(x) \in L_2^n[0,1]$;
- $P(x)$, $M(x)$, $K(x,s)$ $n \times n$ матрицы, элементы которых суммируем с квадратом соответственно в областях $[0,1]$, $[0,1]$ и $[0,1] \times [0,1]$;
- постоянная $\alpha \in [0,1]$; при $\alpha = 1$ уравнение $Tu=f$ представляет и.-д. уравнение Вольтерра, а при $\alpha = 0$ - и.-д. уравнение Фредгольма.

Следовательно, уравнение $Tu=f$ (1) является обобщением этих известных видов и.-д. уравнений.

Для выяснения разрешимости краевой задачи (1) определим дефектное подпространство сужения оператора $D = \frac{d}{dx}$ на n -векторно-значную функцию u краевым условием задачи(1)

$$Su: \begin{cases} Du \equiv \dot{u}(x) \\ u(0) - \int_0^1 M(x)\dot{u}(x)dx = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение $Su=f$ разрешимо при $\forall f(x) \in L_2^n[0,1]$. Действительно, полагая $u(x) = \int_0^x f(t)dt + C$ и подставляя его

в краевое условие, получим значение $u(x) = \int_0^x f(t)dt + \int_0^1 M(t)f(t)dt$, удовлетворяющее

уравнению $Su = f$ при $\forall f \in L_2^n[0,1]$.

Таким образом, имеет место

Лемма 1. Дефектное подпространство оператора $S(2)$ равно нулю, т.е. $Z_s^+ = 0$.

Пусть матрица $P(x)$ произвольная, удовлетворяющая условию 2. Если при тех же ограничениях матрицы $M(x)$ и $K(x,s)$ произвольны, то, очевидно, что краевая задача (1) не разрешима при $\forall f(x) \in L_2^n[0,1]$

Однако если специальным образом выбрать $M(x)$ и $K(x,s)$ в некоторой части квадрата $0 \leq x, s \leq 1$, то окажется, что краевая задача (1) станет разрешимой при $\forall f(x) \in L_2^n[0,1]$ и согласно терминологии [1] такое уравнение $T_1 u = f$ называется везде разрешимым. Осуществлять этот специальный выбор матриц $M(x)$ и $K(x,s)$ будем с помощью s -сопряженного оператора T_{1s}^* , используя аналог формулы Лагранжа [2], получаемой интегрированием по частям при любых $u \in D_2^n[0,1]$, $u \in L_2^n[0,1]$ и $\forall v \in L_2^n[0,1]$:

$$\begin{aligned} \int_0^1 T_1 u v dx &= \int_0^1 \dot{u} v dx + \int_0^1 P u v dx + \int_0^1 \int_0^{x^\alpha} K(x,s)\dot{u}(s)ds v(x) dx = \\ &= \int_0^1 \dot{u} v dx + u(x) \int_1^x P^T(s)v(s)ds \Big|_{x=0}^1 + \\ &+ \int_0^1 \dot{u}(x) \int_1^x P^T(s)v(s)ds dx + \\ &+ \int_0^1 \dot{u}(x) \int_{\frac{1}{x^\alpha}}^1 K^T(s,x)v(s)ds dx = u(0) \int_0^1 P^T(s)v(s)ds + \\ &+ \int_0^1 \dot{u}(x) \left(v(x) + \int_x^1 P^T(s)v(s)ds + \int_{\frac{1}{x^\alpha}}^1 K^T(s,x)v(s)ds \right) dx. \end{aligned}$$

Итак, аналог формулы Лагранжа для и.-д. оператора $T(1)$ имеет вид