

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА a-C ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ СЕПАРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

К. А. САХОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Свойства углеродных покрытий определяются в первую очередь отношением содержания атомов углерода с sp^1 -, sp^3 - и sp^2 -гибридизацией связей [1]. Покрытия с преобладанием sp^3 -фазы по своим свойствам приближаются к свойствам природного алмаза и называются алмазоподобными покрытиями (АПП), а в англоязычной литературе – diamond-like carbon (DLC). Увеличение в покрытиях содержания атомов с sp^1 - или sp^2 -гибридизацией связей соответственно смещает их свойства к свойствам карбинов и графитов. Алмазоподобные покрытия – покрытия, которые широко используются в таких областях, как машиностроение, медицина, электротехника, оптика и т. д. АПП изменяют поверхностные свойства подложки (инструмента, рабочих поверхностей штампов и т. д.), за счет чего возможно получить низкий коэффициент трения, повышенную износостойкость и высокую твердость рабочих поверхностей.

Углеродные покрытия, в структуре которых преобладает sp^2 -гибридизация, обычно обозначают «a-C» (amorphous carbon), а покрытия с преобладанием sp^3 -гибридизации имеют обозначение «ta-C» (tetrahedral amorphous carbon). Согласно [2] установлено, что различия в методах и даже небольшие отличия в технологических параметрах осаждения покрытий обуславливают значительные различия в их структуре и свойствах [3]. При осаждении покрытий с использованием вакуумной дуги постоянного тока в потоке наблюдается большое количество макрочастиц (МЧ) графита, загрязняющих поверхность подложки растущего покрытия и приводящих к образованию разнообразных дефектов на поверхности АПП. Такие покрытия не могут быть использованы в оптике, микроэлектронике, точной механике, медицине и в других отраслях высоких технологий. Для уменьшения концентрации макрочастиц используют сепараторы плазмы.

Покрытия на основе углерода были получены с использованием вакуумной установки УВНИПА-1-001, укомплектованной ионным источником, сепаратором плазменного потока (рисунок 1, а), импульсным источником углеродной плазмы (рисунок 1, б).

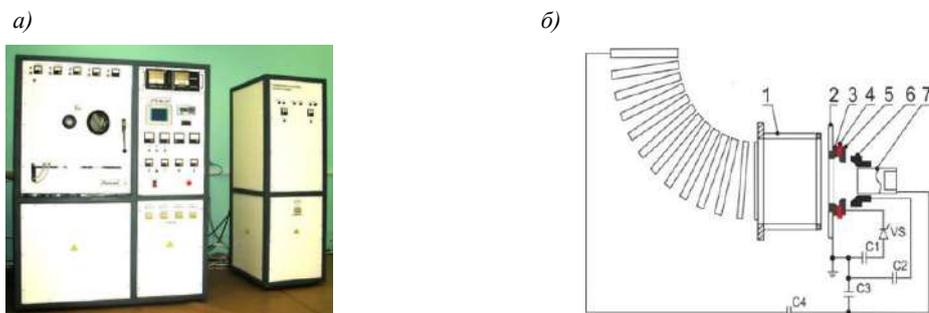


Рисунок 1 – Вакуумная установка УВНИПА-1-001 (а); импульсный генератор углеродной плазмы с сепаратором плазменного потока (б):

1 – анод; 2 – поджигающий электрод; 3 – анод; 4 – соленоид; 5 – графитовый катод

В качестве сепаратора использован криволинейный соленоид с углом поворота плазменного потока на 90 градусов. Отличительной особенностью данного соленоида является его включение в электрическую схему блока питания импульсного генератора углеродной плазмы, при этом возникающее в соленоиде транспортирующее поле является импульсным и возникает в момент импульсного разряда. Геометрически фильтр выполнен в виде части тора с внутренним диаметром 95 мм и длиной 380 мм. Поскольку транспортировка углеродной плазмы с поверхности катода до подложки осуществлялась в криволинейном магнитном поле тороидального соленоида, обладающего индуктивностью, то происходило изменение параметров разрядного контура, формирование L-C-контура, что приводило к увеличению длительности импульса и, как следствие этого, уменьшению плотности электронного потока на поверхности графитового катода.

Покрытия осаждали на полированные кремниевые подложки при температуре 23 °С. Осаждение покрытий проходило при различных напряжениях импульсного дугового разряда (200–450 В, с ша-

гом 50 В) и постоянной частоте следования импульсов разряда 5 Гц. Количество импульсов, определяющее толщину покрытия, составляло 3000.

Микроструктуру покрытий исследовали методом спектроскопии комбинационного рассеивания с помощью КР микроскопа Senterra (Bruker). Возбуждение спектров осуществлялось излучением с длиной волны 532 нм и мощностью 20 мВт.

Спектры комбинационного рассеивания углеродных покрытий представляют собой суперпозицию, так называемых D- и G-пиков, с центрами, находящимися при 1350 см^{-1} и 1560 см^{-1} соответственно. На рисунке 2 представлены параметры спектров осажденных покрытий.

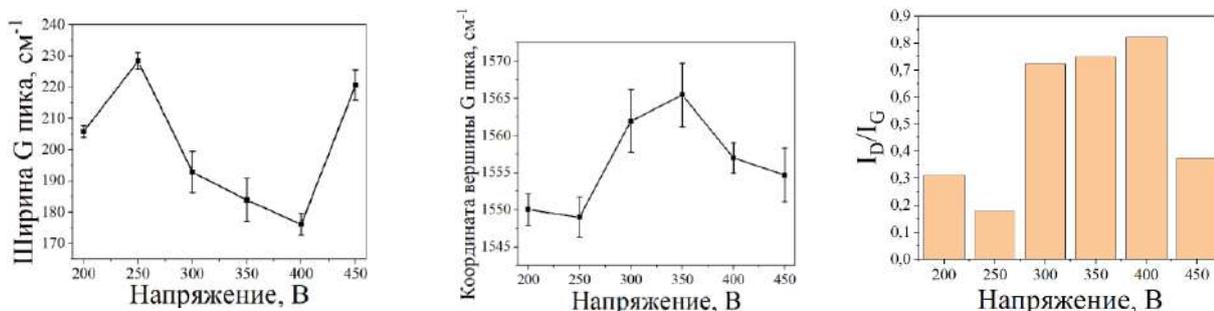


Рисунок 2 – Параметры спектров КР-покрытий, осажденных из сепарированных потоков углеродной плазмы при различном напряжении разряда

В результате анализа спектров можно установить, что увеличение степени разупорядоченности структуры а-С-покрытия, осажденного из сепарированного потока, связано с ростом содержания атомов с sp^3 -гибридизацией связей. Соответственно, из анализа параметров спектров полученных покрытий можно сделать вывод, что при напряжениях 300, 350 и 400 В структура имеет преобладающую sp^2 -фазу, при напряжениях 200, 250 и 450 В преобладает sp^3 -фаза.

Измерение твердости и модуля упругости покрытий выполняли методом динамического механического анализа (DMA), являющегося одним из методов индентирования, в процессе которого на поступательное внедрение индентора накладываются гармонические колебания, что позволяет определить твердость и модуль упругости почти в каждой точке углубления индентора, т. е. получить практически непрерывные зависимости механических характеристик от глубины. Частота, на которой возбуждались колебания в динамическом режиме, равнялась 20 Гц. При этом типичная амплитуда колебаний составила порядка нескольких нанометров при максимальной нагрузке 40 мН.

Среднее значение твердости и модуля упругости покрытий, рассчитанное при глубине внедрения индентора 20 нм, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения твердости и модуля упругости осажденных покрытий

Показатель	Значение					
	200	250	300	350	400	450
Напряжение, В	200	250	300	350	400	450
Твердость, Н, ГПа	12,62	12,2	14,1	20,5	17,2	13,7
Модуль упругости, Е, ГПа	159,7	151,05	148,8	166,6	159,3	158

Установлено, что изменения твердости и модуля упругости соответствуют изменению микроструктуры и, в нашем случае, достигают максимальных значений при напряжении разряда 350 В. Известно [4], что твердость АПП зависит от отношения sp^2/sp^3 атомов углерода и размера углеродного кластера, что согласуется с результатами исследования структуры методом спектроскопии КР.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования Республики Беларусь (проект 20212075).

Список литературы

- 1 Чайковский, Э. Ф. Алмазоподобные пленки углерода / Обзор. инф. Сер. «Монокристаллы и особо чистые вещества» / Э. Ф. Чайковский, В. М. Пузиков А. В. Семенов. – М. : НИИТЭХИМ, 1985. – 365 с.
- 2 Lifshitz, Y. Pitfalls in amorphous carbon studies / Y. Lifshitz // Diamond and Related Materials – 2003. – Vol. 12. – P. 130–140.
- 3 Федосеев, Д. В. Алмаз : справ. / Д. В. Федосеев, Н. В Новиков, А.С. Вишнеvский. – Киев : Наук. думка, 1981. – 78 с.
- 4 Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / Д. Г. Филиппов [и др.] ; под ред. А. В. Рогачева. – М. : Радиотехника, 2020. – 283 с.