

## Исследование процесса напыления DLC покрытий с помощью импульсно-дугового испарителя

Ю.Н. Юрьев, А.В. Гавриленко\*, А.А. Рунц

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия  
avg87@tpu.ru

В статье рассматривается процесс нанесения DLC-покрытия с использованием импульсно-дугового испарителя, а также влияние электрических характеристик импульсной дуги на свойства получаемых DLC-покрытий. Показано, что с увеличением напряжения накопителя, сила тока, подаваемого на катод, увеличивается. Однако частота импульсов практически не влияет на электрические характеристики. После серии нанесений DLC-покрытий в различных условиях эксплуатации было обнаружено, что покрытие, полученное при накопительном напряжении 400 В и частоте импульсов 2 Гц, обладает большей твердостью и модулем упругости соответственно:  $68.8 \pm 8.1$  ГПа и  $511 \pm 66$  ГПа.

**Ключевые слова:** DLC, импульсно-дуговой испаритель, твердость, гибкость.

### 1. Основной раздел

Исследование процесса напыления алмазоподобных покрытий (DLC – diamond-like carbon) с помощью импульсно-дугового испарителя представляет собой важную тему в области поверхностной модификации материалов [1, 2]. DLC покрытие является полезным благодаря своей твердости, химической инертности и износостойкости [3]. Применение DLC покрытий распространено в различных отраслях, включая машиностроение, авиацию, медицинскую технику и электронику, где требуется защита от износа и коррозии, а также высокая твердость [4, 5]. Импульсно-дуговой испаритель является эффективным методом нанесения DLC покрытий, позволяющим достичь высокой адгезии и однородности покрытия. Этот процесс основан на испарении углеродной мишени и последующем осаждении атомов углерода на подложку, что способствует образованию покрытия с желаемыми свойствами [6]. Исследование данного процесса позволяет лучше понять процесс получения DLC покрытий, оптимизировать процесс напыления для повышения качества и прочности DLC покрытия.

Целью настоящей работы является исследование процесса напыления DLC покрытий с помощью импульсно-дугового испарителя.

### 2. Экспериментальная часть

Вся работа проводилась на установке УВНИПА 1–001, импульсно-дуговым испарителем с углеродным катодом. Импульсно-дуговой испаритель представляет собой устройство, инициирование дуги в котором происходит путем разрядки конденсатора большой емкости. При этом замыкание разрядного промежутка происходит через многоступенчатую систему электродов поджига. Схематично работа испарителя показана на рис. 1.

Для сравнительного анализа влияния режимов работы испарителя на свойства покрытий были изучены электрические характеристики разряда, а именно ток, подаваемый на катод при разряде конденсатора при различных напряжениях накопителя, а также при различной частоте следования импульсов. Для оценки энергетической составляющей частиц, приходящих на подложку, было произведено измерение напряжения на подложке, находящейся под плавающим потенциалом.

На рис. 2 представлена зависимость тока, подаваемого на катод, от напряжения накопителя и частоты следования импульсов.

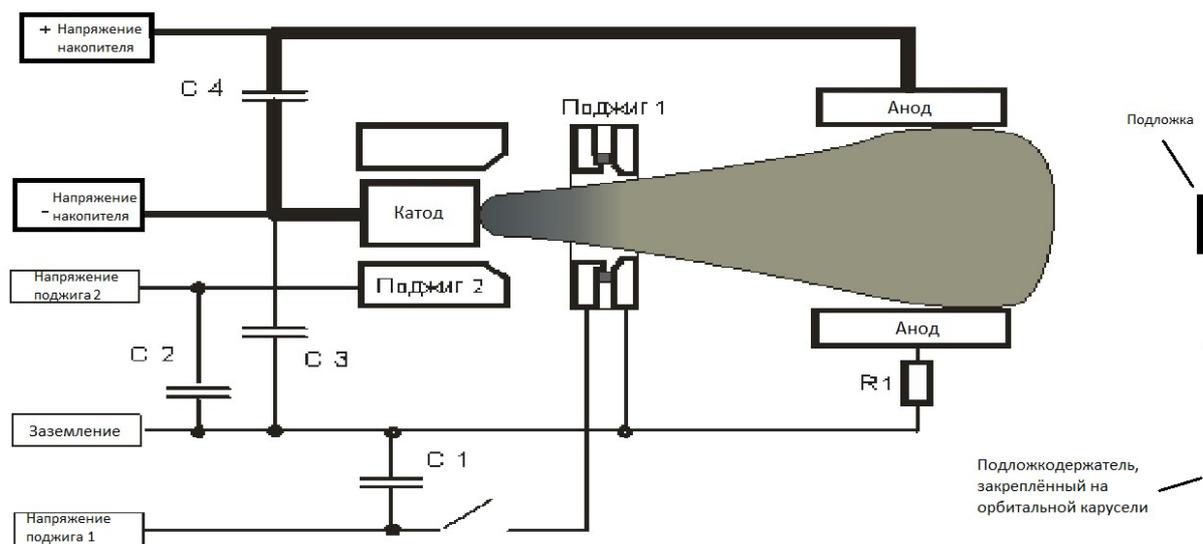


Рис. 1. Схема эксперимента.

На данном графике видно, что при увеличении напряжения накопителя, увеличивается и ток, подаваемый на катод, при этом частота импульса имеет малое значение для силы тока и формы графика.

Следующим этапом было исследование энергии налетающих атомов углерода на подложку и нахождение зависимости с характеристиками полученных DLC покрытий. Предполагается, что самыми важными факторами является энергия налетающих частиц углерода и электрические характеристики импульсно-дугового испарителя [7]. Была закреплена подложка, электрически изолированная от камеры, проведена медная проволока к подложке и электрическому вакуумному вводу, далее провели провод из вакуумного ввода к заземленному каркасу установки, подключили к данной системе резистор и с помощью осциллографа измерялось напряжение на подложке, результаты представлены далее.

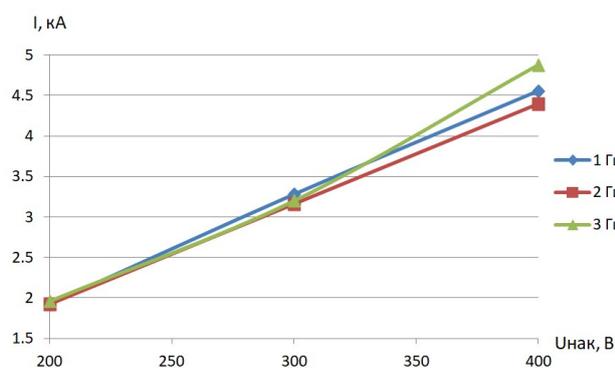


Рис. 2. Зависимость тока, подаваемого на катод, от напряжения накопителя и частоты импульсов.

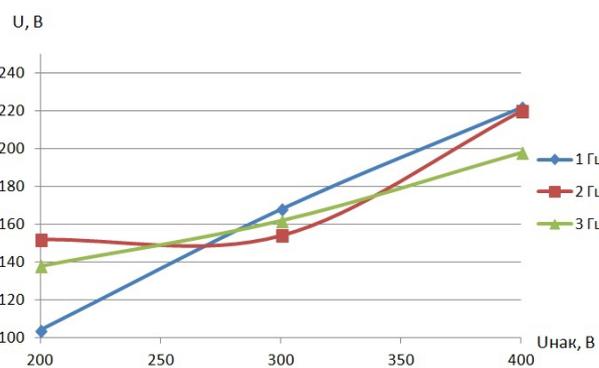


Рис. 3. Зависимость напряжения на подложке от напряжения накопителя и частоты импульсов.

На данном графике видно, что с увеличением напряжения накопителя, увеличивается и напряжение на подложке, что в свою очередь говорит об увеличении энергии налетающих частиц.

Далее проводилось исследование зависимости механических характеристик, полученных DLC покрытий от напряжения накопителя и частоты импульсов. В связи с исследованием процесса в прошлых научных работах лаборатории НОЦ им. Вейнберга [8, 9], были выбраны следующие параметры процесса напыления:

**Таблица 1.** Режимы напыления DLC покрытий.

| № | Напряжение накопителя, В | Частота импульсов, Гц |
|---|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 200                      | 1                     |
| 2 | 200                      | 2                     |
| 3 | 200                      | 3                     |
| 4 | 300                      | 1                     |
| 5 | 300                      | 2                     |
| 6 | 300                      | 3                     |
| 7 | 400                      | 1                     |
| 8 | 400                      | 2                     |
| 9 | 400                      | 3                     |

Было получено 9 DLC покрытий в разных режимах осаждения определены их значения твёрдости и модуля упругости, построены графики зависимости данных характеристик от напряжения накопителя и частоты импульсов, они представлены далее.

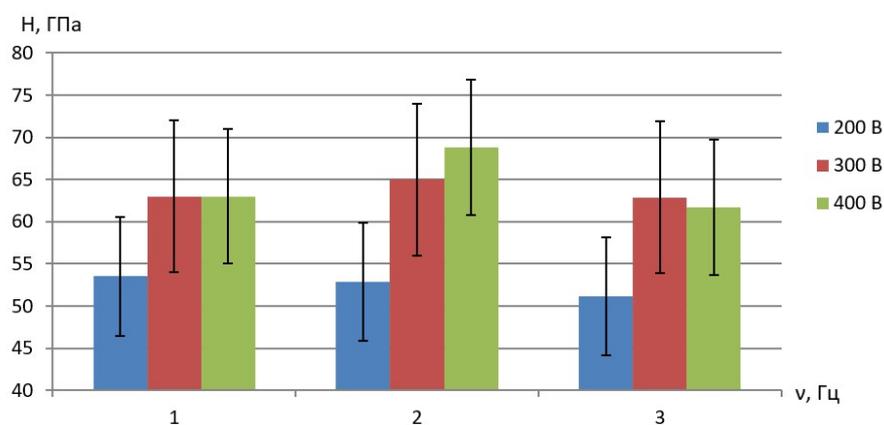


Рис. 4. Зависимость твёрдости от напряжения накопителя и частоты импульсов.

На данной гистограмме видно, что твёрдость покрытий, полученных при напряжении накопителя в 300 и 400 В, больше, чем при 200 В, но находится в одном диапазоне значений. При этом, при напряжении накопителя в 400 В, большей твёрдостью обладает покрытие, полученное с частотой в 2 Гц.

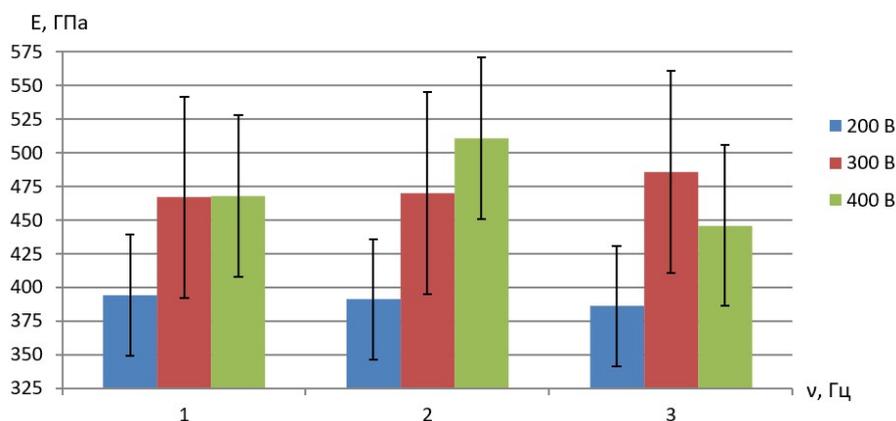


Рис. 5. Зависимость модуля упругости от напряжения накопителя и частоты импульсов.

Покрытие, полученное с напряжением накопителя в 300 В и частотой импульсов в 3 Гц, обладает большим модулем упругости, чем покрытие при 400 В и той же частотой. С учётом погрешности можно сказать, что покрытия, полученные при 300 и 400 В, находятся в одном

диапазоне значений, но наибольшей упругостью вновь обладает покрытие, полученное с частотой импульсов в 2 Гц и напряжением накопителя в 400 В.

### 3. Заключение

В процессе выполнения работы были исследованы электрические характеристики импульсно-дугового испарителя, а также проведён ряд осадений DLC покрытий при разных режимах работы. Получены значения твёрдости и модуля упругости полученных покрытий, наибольшей твёрдостью и модулем упругости обладает покрытие, полученное при напряжении накопителя в 400 В и частоте импульсов в 2 Гц. Наименьшей твёрдостью и модулем упругости обладают покрытия, полученные при напряжении накопителя в 200 В. Данные результаты, говорят о прямой зависимости твёрдости и модуля упругости DLC покрытий от частоты импульсов и напряжения накопителя импульсно-дугового испарителя.

### 4. Литература

- [1] Д.А. Карпов, В.Н. Литуновский, *Плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ): Физические основы, использования в технологиях*. СПб.: ФГУП “НИИЭФА им. ДВ Ефремова”, 2009.
- [2] М.В. Астафуров, П.П. Петрова, Алмазоподобные покрытия: технологии и применение, *Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее: сборник научных статей 6-й Всероссийской научной конференции*, 19–20 октября 2023, Курск, Том 3, 352–354, 2023.
- [3] R. Sharma, P.K. Varhai, N. Kumari, Corrosion resistant behaviour of DLC films, *Thin Solid Films*. Vol. **516**(16), 5397–5403, 2008.
- [4] Diamond-Like Carbon Coatings [online], 26.05.2024; <https://acreetech.com/dlc-coatings/>
- [5] Ф.Р. Княжев, М.С. Маляревская, Обзор возможностей применения алмазоподобных (DLC) плёнок в различных отраслях, *Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ "Нацразвитие"*, 28–30, 2021.
- [6] Diamond-like carbon coating under oleic acid lubrication: Evidence for graphene oxide formation in superlow friction [online], 02.04.2024; <https://www.nature.com/articles/srep46394>
- [7] С.М. Боровиков, Р.В. Пигаль, О.И. Терещук. Свойства и применение DLC-покрытий, *Молодой ученый*, 2021. **6**(348), 6–9, 2021, url: <https://moluch.ru/archive/348/78482/>
- [8] А.А. Рунц, Ю.Н. Юрьев, Е.Н. Больбасов, Сегнетоэлектрические мембраны с DLC-покрытием в виде сосудистых пластырей: физические свойства, *Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции*, 25–30 октября 2021, Томск, 175–176, 2021.
- [9] А.А. Рунц и др. Исследование влияния режимов осаждения пленок алмазоподобного углерода на их физико-механические характеристики, *Прикладная физика*, **6**, 58, 2021.
- [10] D.K. Rajak, A. Kumar, B. Ajit, P.L. Menezes, Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings: Classifications, Properties, and Applications, *Appl. Sci.*, **11**, 4445, 2021.