

Данный тип оборудования позволит обеспечить высокую воспроизводимость толщин и оптических констант напыляемых покрытий в режимах автоматического нанесения. Для контроля толщины наносимого покрытия вакуумная установка оснащена системой оптического контроля на пропускания. В докладе рассмотрена компоновка установки, ее основные системы, узлы и элементы, а также показаны примеры реализованных процессов нанесения (рис.2.).

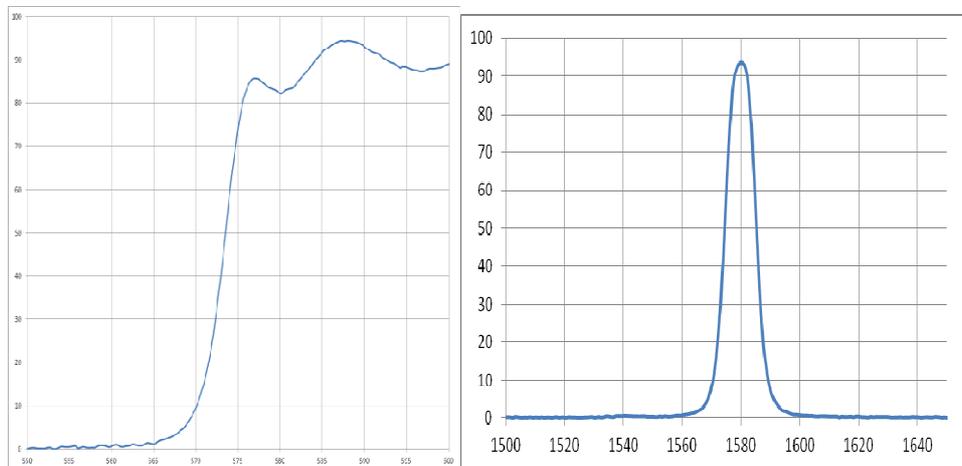


Рис. 2. Спектры пропускания покрытий.

## Исследование процесса формирования плёнок, полученных в матричном режиме с помощью НЧ-плазматрона атмосферного давления

*А.В. Шведов, А.Н. Лямин, В.М. Елинсон*

*“Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”,  
125993, Российская федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4*

*E-mail: [seriousash@yandex.ru](mailto:seriousash@yandex.ru)*

*В настоящей работе представлены результаты исследования формирования углеродных покрытий, полученных при помощи низкотемпературного низкочастотного плазматрона при атмосферном давлении в матричном режиме нанесения. Произведена модернизация установки для работы в матричном режиме. Показана возможность формирования углеродных покрытий в матричном режиме. Определена толщина полученных покрытий, а так же влияние плазмообразующего газа на скорость роста покрытия.*

*Investigation of carbon coatings formation obtained by ion-plasma methods at atmospheric pressure in matrix mode of deposition. A.V. Shvedov, A.N. Lyamin, V.M. Elinson. This paper is devoted to investigation of formation of carbon coatings produced by a low temperature and low frequency plasmatron at atmospheric pressure in matrix mode of deposition. The installation was upgraded to work in matrix mode. The possibility of formation of carbon coatings in the matrix mode is shown. The thickness of obtained coatings is determined, as well as the effect of the plasma-forming gas on the growth rate of the coating.*

Современная промышленность всё больше заинтересована в покрытиях, обладающих такими свойствами, как устойчивость к микробиологическим загрязнениям, повышенная прочность и низкая смачиваемость [3 – 6]. Для создания подобного защитного покрытия необходимо сформировать развитую поверхность с особым рельефом и химическим составом. Особого

внимания заслуживают углеродсодержащие покрытия, которые способны обеспечивать защиту изделий в условиях агрессивной окружающей среды [1] за счёт возможности углерода формировать поверхностный слой с полностью компенсированными валентными связями. Кроме того, свойства углеродных покрытий изменяются в широких пределах в зависимости от технологических параметров нанесения, что позволяет создавать тонкие покрытия с заданными характеристиками [2]. В последнее время всё больше работ посвящается исследованиям и применениям ионно-плазменных методов, с использованием газовых разрядов атмосферного давления. Благодаря отсутствию необходимости создания и поддержания вакуума, простому управлению процессами, доступному оборудованию и возможностью использования различных типов газовых разрядов, ионно-плазменные методы атмосферного давления находят всё новые применения в различных сферах народного хозяйства: для синтеза металлических порошков [3], для осаждения тонких плёнок из газовой фазы [4], обработки текстильных материалов [5], а также для биомедицинских применений [6] и др.

Одним из широко применяемых типов газовых разрядов является диэлектрический барьерный разряд (ДБР) атмосферного давления. Принцип тлеющего разряда, лежащий в основе его работы, позволяет эффективно обрабатывать поверхности различных материалов по всей площади. Однако ДБР не лишён ряда недостатков, к которым относится зависимость процессов горения газового разряда от параметров окружающей среды и высокой степени деструкции диэлектрических материалов электродов. Одним из наиболее перспективных типов газовых разрядов является низкочастотный (НЧ) дуговой газовый разряд низкотемпературной плазмы. Он способен обеспечить локальное формирование покрытия с минимальным влиянием окружающей среды и низкой степенью деструкции материала подложки, что особенно важно при обработке термолабильных полимеров [7]. НЧ плазматрон атмосферного давления позволяет формировать углеродные покрытия с высокой воспроизводимостью и минимальными затратами. Однако, для создания развитой поверхности по всей площади обрабатываемого изделия или подложки необходимо исследование такого режима работы НЧ плазматрона, при котором возможно многоуровневое формирование тонкого покрытия с контролируемыми геометрическими параметрами.

Матричный режим нанесения представляет собой процесс, при котором происходит локальное (точечное) формирование покрытия с последующим нанесением нового покрытия с фиксированным расстоянием между точками нанесения. Проведя ранее ряд исследований в области формирования углеродных и фторуглеродных покрытий ионно-плазменным методом при атмосферном давлении [8] были установлены профиль и диаметр полученных покрытий. Исходя из полученных данных, было принято решение осуществлять нанесение в точках, которые являются вершинами равностороннего треугольника, а расстояние между этими вершинами принять за технологический параметр матричного режима, как показано на рис. 1, где  $a$  – расстояние между вершинами. Таким образом, формирование покрытия производилось за счёт «перекрытия» получаемых тонких углеродных плёнок, а расстояние между вершинами определяло как толщину, так и рельеф конечного покрытия, что было подтверждено дальнейшими исследованиями.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование процессов формирования углеродных плёнок, полученных при матричном режиме нанесения. С помощью НЧ-плазматрона атмосферного давления.

Для достижения поставленной цели необходимо определить геометрические параметры осаждения из газовой фазы углеродных покрытий, создать экспериментальную установку для осуществления нанесения покрытия в разных точках, а так же установить и исследовать возможность формирования данных покрытий.

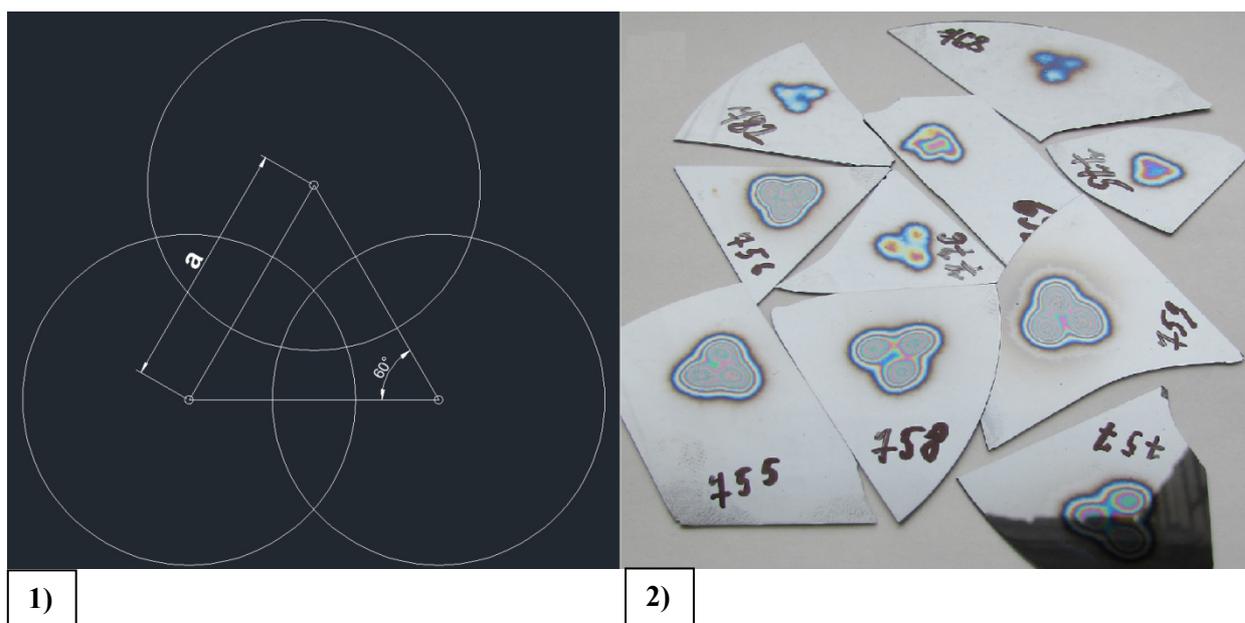


Рис. 1. Матричный режим нанесения: 1 – схематическое изображение; 2 – сформированные покрытия.

Для осуществления матричного режима нанесения углеродных покрытий была проведена модернизация экспериментальной установки, в основе которой лежит НЧ плазматрон атмосферного давления (мощность до 100 Вт). Модернизация заключалась в монтаже НЧ плазматрона на ЧПУ основу для прецизионного управления процессами нанесения покрытий, а также для перемещения плазматрона над подложкой по 3-м осям (рис. 2).



Рис. 2. НЧ-плазматрон на ЧПУ основе.

Работа НЧ плазматрона атмосферного давления обеспечивалась подачей нескольких потоков газов: плазмообразующего и транспортного газа (гелий и аргон) и плёнкообразующего газа (пары циклогексана  $C_6H_{12}$ ) в количестве до 2,5% от суммарного газового потока. Схема подключения газового блока представлена на рис. 3.

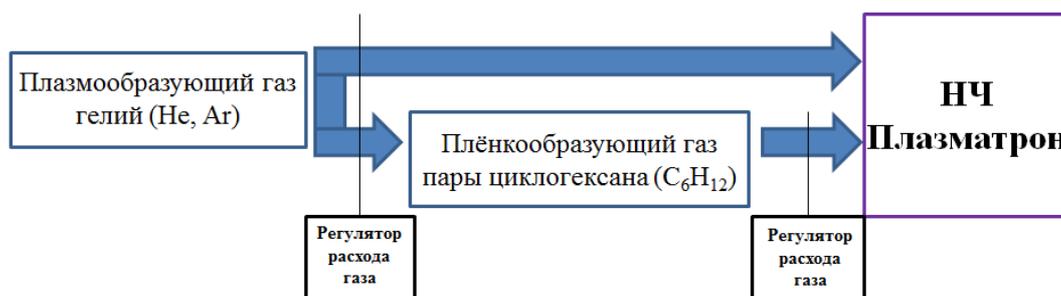


Рис. 3. Схема подключения газового блока.

Формирование покрытий производилось по следующим технологическим параметрам: используемый плазмообразующий/транспортной газ (He или Ar), расстояние плазматрон-подложка (15–24 мм), время нанесения (5–20 с), расстояние между вершинами равностороннего треугольника (3–6 мм). Суммарный поток газов составлял  $7,1 \pm 0,1$  л/мин. Формирование покрытий производилось на подложки из монокристаллического кремния для последующего измерения толщины на микроинтерферометре МИИ-4.

Полученные покрытия представляли собой единую тонкую углеродную плёнку с неярко выраженными точками, в которых происходило нанесение (рис. 1). Исследования толщины полученных покрытий проводились в нескольких точках: в центре покрытия, в точках вершин треугольника и посередине одного из бёдер треугольника. Исследование показало, что скорость роста углеродных покрытий значительно зависит от расстояния плазматрон-подложка и времени нанесения. Это связано с увеличенным энерговыделением в газовый разряд между соплом плазматрона и подложкой, на которую производилось нанесение. Так же это связано с увеличением диффузии частичек газа из плазменной струи в окружающую среду. Было установлено, что использование аргона в качестве плазмообразующего газа позволяет добиться до 5-тикратного увеличения скорости роста, что, скорее всего, связано с более интенсивной ионизацией газовой смеси (рис. 4).

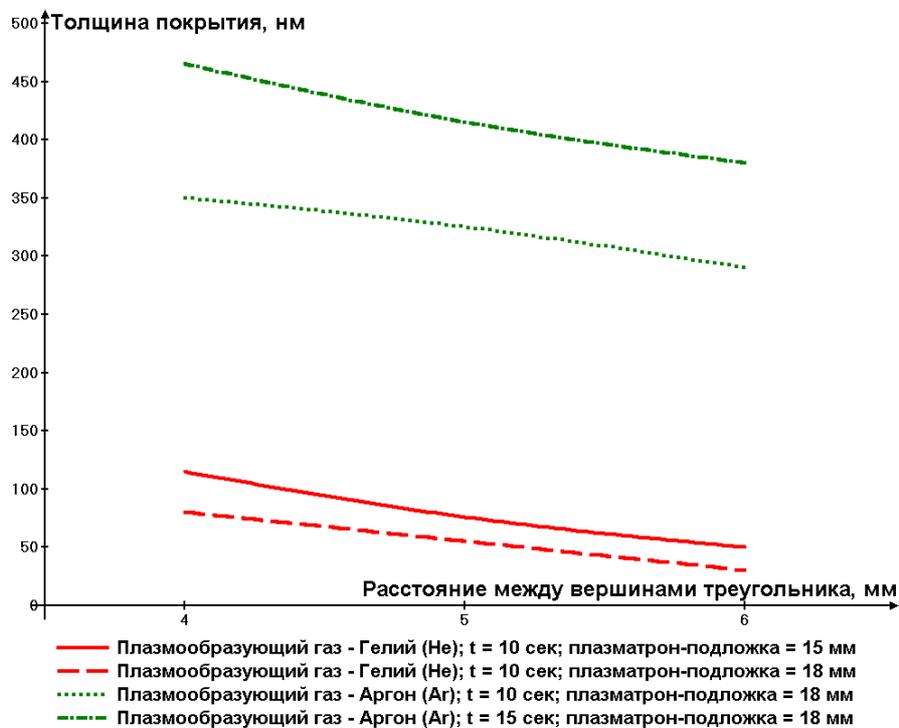


Рис. 4. Зависимость средней толщины полученных углеродных покрытий от расстояния между вершинами треугольника, от расстояния плазматрон-подложка и от используемых плазмообразующих газов.

Расстояние между вершинами треугольника оказывает существенное влияние на толщину полученных покрытий в различных точках.

Это вызвано фиксированным диаметром формируемых в точке покрытий, который значительно зависит от расстояния «плазматрон-подложка», но в большей степени зависит от времени нанесения покрытия менее 10 с. Это обусловлено особенностями горения газового разряда в атмосфере и его распространением по поверхности подложки, а также диаметра сопла плазматрона. Таким образом, при значительных расстояниях между вершинами треугольника в центре итогового полученного покрытия скорость роста замедляется, но увеличивается на точках вершин.

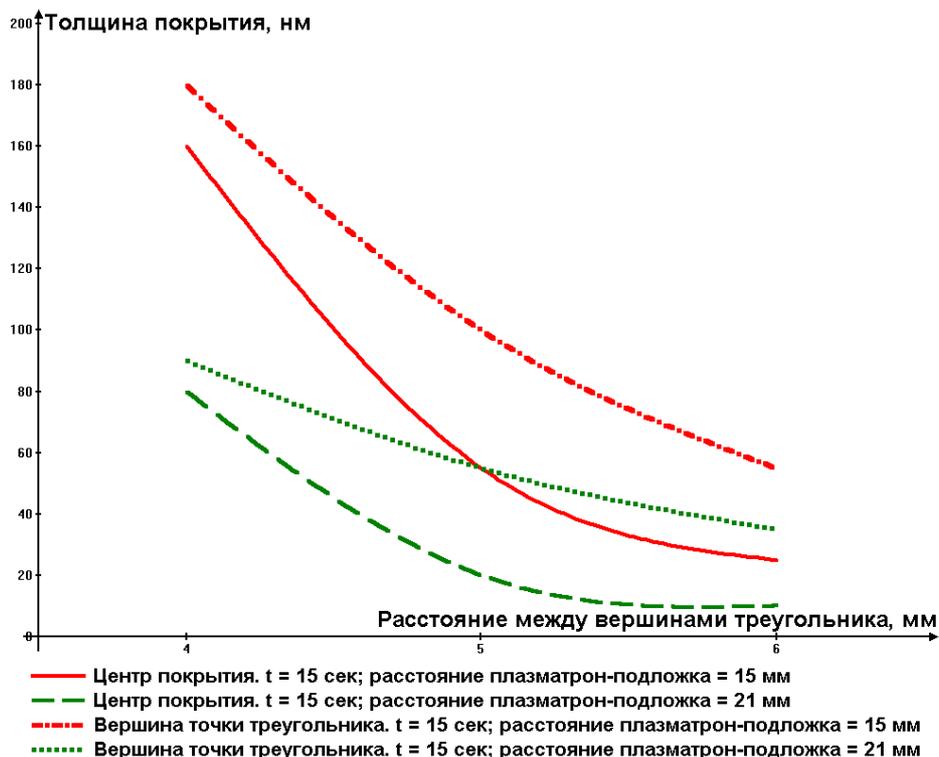


Рис. 5. Зависимость толщины в различных точках измерения полученных углеродных покрытий от расстояния между вершинами треугольника и от расстояния плазматрон-подложка. Плазмообразующий газ – гелий.

В результате проделанной работы была показана возможность формирования углеродных покрытий в матричном режиме нанесения. Было установлено влияние технологических параметров процессов нанесения на физические свойства сформированных покрытий. Использование в качестве плазмообразующего газа Ag позволило добиться значительного увеличения толщины полученных покрытий по сравнению с He. В частности, было показано, что толщина углеродных покрытий значительно зависит от расстояния плазматрон-подложка, времени нанесения и расстояния между вершинами равностороннего треугольника. Однако в зависимости от расстояния плазматрон-подложка и расстояния между вершинами треугольника максимальная толщина углеродного покрытия варьируется от центра покрытия, до точек нанесения.

#### Литература

1. М.С. Зибров, А.А. Писарев, Г.В. Ходаченко, Д.В. Мозгрин, «Создание тонких защитных углеродных покрытий на алюминии» // Успехи прикладной физики, 2013, том 1, № 2, с 167 – 168.
2. И.П. Суздаев // Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов // М.: КомКнига, 2007, 592 с.

3. A. Lazea-Stoyanova, V.S. Teodorescu and G. Dinescu, Innovative atmospheric pressure plasma jet for copper particles synthesis // 22nd International Symposium on Plasma Chemistry, 2015; Antwerp, Belgium.
4. Jana Kredl, Juergen F. Kolb, Uta Schnabel, Martin Polak, Klaus-DieterWeltmann, Deposition of Antimicrobial Copper-Rich Coatings on Polymers by Atmospheric Pressure Jet Plasmas // Materials 2016, 9, 274; doi:10.3390/ma9040274.
5. А. М. Кутепов, А. Г. Захаров, А. И. Максимов, В. А. Титов, «Плазменное модифицирование текстильных материалов: перспективы и проблемы» // Рос.хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2002, т. XLVI, № 1, с 103.
6. В.М. Елинсон, В.А. Петров, В.И. Смирнов, Т.С. Кузнецова, В.П. Холоденков // «Использование холодной плазмы атмосферного давления для инактивации вегетативных и споровых форм микроорганизмов» // Материалы XVIII Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России. Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники», М. 2012, с. 351 – 355.
7. А.В. Шведов, А.Н. Лямин, В.М. Елинсон, Л.И. Кравец «Исследование состава и механических характеристик углеродных и фторуглеродных покрытий, сформированных ионно-плазменными методами при атмосферном давлении» // XXI Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России. Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники», М. 2016, С. 192 – 196.
8. А.Н. Лямин, А.В. Шведов, В.М. Елинсон, «Исследование состава и механических характеристик углеродных и фторуглеродных покрытий, сформированных ионно-плазменными методами при атмосферном давлении» // Материалы XII международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», М: Новелла, 2017, с. 266 – 270.