

УДК 621.793

Ю. А. СЫСОЕВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## О ВОЗМОЖНОСТИ УСТРАНЕНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА ВВОДОМ ЭНЕРГИИ В ЗОНУ ЕЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ

*Кратко проанализированы известные методы снижения количества микрокапель в вакуумно-дуговых покрытиях. Показано, что они не позволяют полностью устранять микрокапли из плазменного потока. Рассмотрена возможность устранения капельной фазы вакуумно-дугового разряда путем ее испарения при вводе СВЧ-энергии в зону ее транспортировки. Предложено вакуумно-дуговое устройство для реализации этого метода. Выполнена оценка необходимой СВЧ-энергии для испарения капельной фазы титановой плазмы при токе дуги 100 А. Рассмотрены неучтенные при оценке факторы, которые могут приводить к снижению полученного значения.*

**Ключевые слова:** вакуумно-дуговой разряд, ионно-плазменные технологии, капельная фаза вакуумно-дугового разряда, СВЧ-энергия.

### Введение

В составе плазменного потока, генерируемого катодным пятном (КП) вакуумно-дугового разряда, присутствуют ионы разной кратности заряда, нейтральные частицы (пар), а также макрочастицы (микрокапли и твердые осколки материала катода) [1]. Соотношение между ионной и микрокапельной фракциями (доля нейтрального пара не превышает 1 % [2]) зависит от ряда условий: материала катода, тока дуги, температуры на поверхности катода, состояния поверхности катода и др. На долю микрокапель (МК) обычно приходится до нескольких десятков процентов от проэродировавшей массы катода [2].

Обычно в технологиях осаждения вакуумно-дуговых покрытий МК являются нежелательным явлением, поскольку снижают характеристики покрытий. Покрытия, осажденные при наличии в плазменном потоке МК, характеризуются неоднородностью структуры, высокой пористостью и шероховатостью поверхности. Особенно недопустимо присутствие МК в покрытиях для оптики и микроэлектроники [3], а также в пленках нанометровых толщин. Качество защитных покрытий, применяемых на деталях авиационной техники (например, на лопатках ГТД) при их получении вакуумно-дуговыми методами при отсутствии микрокапель, будет выше.

Проблема устранения МК из плазменного потока еще окончательно не решена, так как суще-

ствующие технические решения недостаточно эффективны. В этой связи поиск новых методов устранения МК из плазменного потока является актуальным.

*Целью работы* является оценка возможности устранения МК из плазменного потока путем их испарения за счет нагрева при вводе СВЧ-энергии в зону их транспортировки.

### 1. Анализ состояния вопроса

Установленные к настоящему времени закономерности возникновения и поведения МК используются при создании источников плазмы для снижения их количества в плазменном потоке. Разработаны импульсные источники плазмы, позволяющие заметно снизить количество МК в структуре сформированного покрытия [4], источники плазмы, в которых осуществляется быстрое перемещение КП [5], с увеличенной площадью поверхности катода [6], с применением фокусирующего поля, позволяющего увеличить ионную компоненту плазменного потока на обрабатываемой поверхности при том же количестве МК [3].

Перечисленные решения в ряде случаев являются достаточно действенными. Так, фокусировка плазменного потока позволяет уменьшить количество МК на оси системы и, соответственно, в покрытии практически на порядок. По данным Тамагаки, приведенным в [3], при прочих равных условиях содержание МК (размером 0,5 мкм и более) в

покрытии TiN толщиной 2,5 мкм, полученном в режиме фокусировки плазменного потока, не превышало 900 частиц на 1 м<sup>2</sup>, а при отсутствии фокусировки – 8500.

Более полное устранение МК из плазменного потока достигается с помощью специальных устройств, которые могут иметь самую различную конструкцию – от механических сепараторов [7] до оптически непрозрачных электромагнитных плазменных фильтров [8]. Работа последних основана на транспортировке плазменного потока в скрещенных  $E \times H$  полях и обеспечении оптической непрозрачности системы в направлении распространения плазменного потока. К таким устройствам, в частности, относятся криволинейные плазменные фильтры, которые могут быть выполнены в виде четверти тора. Тороидальные плазменные фильтры позволяют снижать содержание МК от 15 до 150 раз [9]. Тем не менее и они пропускают МК на выход фильтра, что связано с отражением частиц от стенок плазменного канала. Для устранения этого явления внутри тороидального канала располагают дополнительные конструктивные элементы [10].

Снижение количества МК в потоке плазмы с помощью плазменных фильтров на один-два порядка является непростой задачей. Во-первых, сам фильтр представляет собой достаточно сложную и дорогую конструкцию. Во-вторых, как отмечено И.И. Аксеновым в [11], все известные и наиболее распространенные криволинейные фильтры характеризуются крайне неоднородным поперечным распределением плотности плазменного потока – эффективная площадь поперечного сечения потока для большинства таких фильтров составляет всего несколько квадратных сантиметров, в лучшем случае – несколько десятков. Поэтому получение покрытий с равномерной толщиной на изделиях небольших размеров возможно только путем принятия специальных мер – введением на выходном прямолинейном участке плазмоведа дополнительных электродов [12]. Если размеры изделий превышают сечение плазменного потока, то равномерную толщину покрытий на них можно получить только при дополнительном усложнении системы путем введения узлов развертки плазменного потока [13]. В-третьих, в плазменных фильтрах происходят потери ионного тока. Системный коэффициент, характеризующий отношение ионного тока на выходе плазменного фильтра к току дуги, в большинстве конструкций имеет значение порядка 2,5 % [3].

В последнее время происходит поиск новых методов устранения МК из плазменного потока. Возможность создания условий для электростатической изоляции микрочастиц от поверхности синтеза покрытия показана в [14]. Ряд исследований посвя-

щен изучению процесса испарения МК при их перемещении к зоне конденсации [15, 16], приводящий, при определенных условиях, к уменьшению количества МК и их размеров на поверхности. По данным [17] средний диаметр МК на поверхности образцов уменьшается от 3,24 до 1,12 ( $\pm 0.20$ ) мкм при увеличении длины транспортировки МК от 0,22 до 0,52 м. Такое уменьшение размеров МК, по всей вероятности, связано с их испарением при движении к зоне конденсации.

## 2. Результаты и обсуждение

Скорость испарения  $v_{\text{исп}}$  микрокапель по лэнгмюровскому механизму может быть найдена из зависимости [18]

$$v_{\text{исп}} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{m_a}{2\pi RT}} \left[ \exp\left(A - \frac{B}{T}\right) - p_{\text{ост}} \right], \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала микрокапли;  $m_a$  – атомный вес материала;  $A, B$  – табулированные постоянные;  $p_{\text{ост}}$  – остаточное давление газов.

Время полного испарения МК титана различных размеров, рассчитанное по (1) для разных температур, показано на рис. 1. Как видно из графиков, при температурах МК, близких к температуре кипения, их испарение происходит в зависимости от размеров МК за время порядка  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  с. Среднее время нахождения МК в движении от катода до поверхности конденсации имеет значение  $\sim 6 \cdot 10^{-2}$  с (при их скорости  $v_{\text{ср}}$  порядка 5 м/с [2] и проходимом расстоянии  $\sim 0,3$  м), что на порядок и более превышает время испарения МК при температуре кипения.

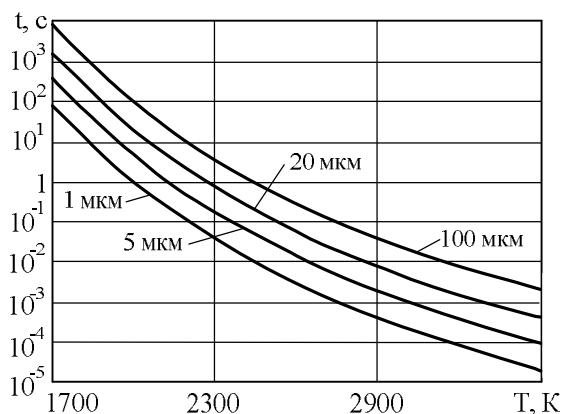


Рис. 1. Время испарения микрокапель титана различных размеров в зависимости от их температуры

Однако при этом, как свидетельствуют экспериментальные данные, полного испарения МК не происходит, а наблюдается снижение размера МК при увеличении времени их транспортировки [17]. Это может говорить о том, что температура основной части МК при их движении лежит в диапазоне значительно ниже температуры кипения.

Увеличить температуру МК возможно путем ввода энергии в зону их транспортировки. Такой энергией может быть СВЧ-энергия определенного диапазона волн. Для устранения из плазменного потока МК, движущихся в сторону подложки, предложено транспортировать плазменный поток через объемный СВЧ-резонатор, в котором будет происходить нагрев и испарение капель вследствие их взаимодействия с СВЧ-излучением. Возможная конструкция устройства, в которой может быть реализован предложенный механизм, показана на рис. 2.

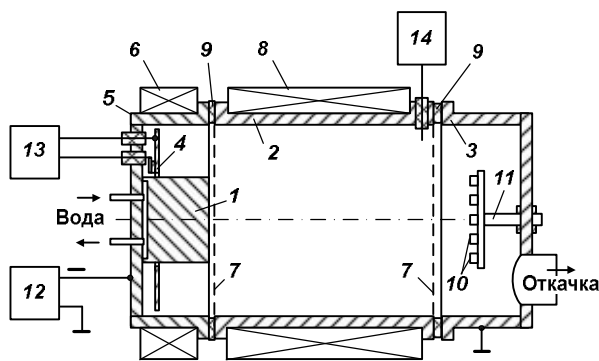


Рис. 2. Вакуумно-дуговое устройство для испарения микрокапель путем их нагрева в СВЧ-резонаторе: 1 – катод; 2 – СВЧ-резонатор; 3 – вакуумная камера; 4 – узел поджига; 5 – корпус источника плазмы; 6, 8 – соленоиды; 7 – сетка резонатора; 9 – изолятор; 10 – изделия; 11 – подложкодержатель, 12 – источник питания дуги; 13 – блок поджига; 14 – генератор СВЧ

Нагрев капель именно электромагнитными волнами СВЧ-диапазона вызван в первую очередь требованием глубокого проникновения волн в плазменный поток, в среде которого движутся капли. Электромагнитные волны проникают в плазму, если их колебания  $\omega$  выше частоты собственных колебаний плазмы  $\omega_0$

$$\omega \geq \omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}}, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $m_e$  – масса электрона;  $n_e$  – концентрация электронов в плазме.

Для волны СВЧ частотой 3 ГГц (длина волны в вакууме  $\lambda = 0,1$  м) критическая концентрация элек-

тронов в плазме  $n_{кр} = 1,1 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ . В область плазмы с большей электронной концентрацией такая волна проникнуть не может. Характерная для плазмы вакуумно-дугового разряда концентрация заряженных частиц в режиме ионной очистки (высокий вакуум) оценивается как  $n_e = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-3}$  [19], при осаждении покрытий с участием реакционных газов концентрация частиц увеличивается на один-два порядка. Следовательно, волна частотой 3 ГГц будет распространяться в плазме вакуумно-дугового разряда практически без отражений. Наличие в рассматриваемых системах магнитных полей, а также постоянное изменение концентрации плазмы в технологическом объеме как по длине, так и по радиусу, и то обстоятельство, что для промышленного применения разрешена меньшая частота (2,45 ГГц), может приводить к возможному отражению волн от отдельных плазменных сгустков с высокой концентрацией, что будет выполнять роль своеобразного диссектора и обеспечивать более полное поглощение МК СВЧ-энергии.

Оценим мощность СВЧ-энергии, необходимой для нагрева МК в объемном резонаторе от температуры плавления до температуры кипения. При работе источника плазмы происходит эрозия катода, скорость которой зависит от материала катода и определяется коэффициентом электропереноса  $\mu$  (для титана  $\mu = 39 \text{ мкг/Кл}$ ). В сторону подложки движется в виде плазмы часть проэродированного материала катода, в том числе и МК. Скорость их движения исследовалась в [2] и в основном имеет значение 5 м/с.

В зоне резонатора при работе установки (рис. 2) находится суммарная масса капель  $m_{\text{кап } p}$ , которую можно оценить как

$$m_{\text{кап } p} = \frac{l_p k_1 k_2 \mu I_d}{v_{\text{кап}}}, \quad (3)$$

где  $l_p$  – длина резонатора;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий долю массы катода, движущейся к обрабатываемой поверхности, в общей проэродированной массе;  $k_2$  – доля капельной фазы в плазменном потоке;  $I_d$  – ток вакуумно-дугового разряда;  $v_{\text{кап}}$  – скорость капель.

Для нагрева и испарения массы капель  $m_{\text{кап } p}$  необходима энергия

$$P = \frac{1}{k_{\text{пог}}} (P_{\text{наг}} + P_{\text{исп}}), \quad (4)$$

где  $k_{\text{пог}}$  – коэффициент поглощения каплями СВЧ-энергии;  $P_{\text{наг}}$  – энергия на нагрев частиц от температуры плавления до температуры кипения;

$P_{исп}$  – энергия на переход капли в парообразное состояние.

Энергия на нагрев микрокапель определяется как

$$P_{наг} = cm_{кап} \Delta T, \quad (5)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала капли;  $\Delta T$  – разница между температурами плавления и кипения.

Энергия на испарение микрокапель

$$P_{исп} = \lambda m_{кап}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – теплота испарения материала капли.

Важным является вопрос о доле поглощенной каплей энергии СВЧ. При частоте  $f = 3$  ГГц,  $\omega = 2\pi f$

$$\omega\tau \ll 1, \quad (7)$$

где  $\tau$  – транспортное время релаксации.

Транспортное время релаксации связано с проводимостью  $\sigma$  соотношением [20]

$$\sigma = \frac{e^2 n_e \tau}{m_e}. \quad (8)$$

В случае выполнения соотношения (7) справедлива формула Хагена – Рубенса для отражательной способности  $R$  твердого тела [20]

$$R \approx 1 - 2\sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}}. \quad (9)$$

Из (9) для титана ( $\rho_{1600\text{ К}} = 1,6 \cdot 10^{-6}$  Ом·м [21]) коэффициент поглощения волны СВЧ 3 ГГц имеет значение  $k_{пог} \approx 1,04 \cdot 10^{-3}$ . Для сравнения, коэффициент поглощения излучения ртутью ( $\rho_{293\text{ К}} = 0,958 \cdot 10^{-6}$  Ом·м [21]) при близкой частоте ( $f = 5$  ГГц) СВЧ-волны равен  $1,46 \cdot 10^{-3}$  [22].

Оценка энергии, необходимой для нагрева и испарения капель при параметрах  $I_d = 100$  А, катод – титан,  $k_1 = k_2 = 0,5$ ,  $k_{пог} = 1,04 \cdot 10^{-3}$ ,  $v_{кап} = 5$  м/с,  $\Delta T = 1600$  К,  $c_{2000\text{ К}} = 0,989$  кДж/кг·К,  $\lambda = 8,97 \cdot 10^6$  Дж/кг дает следующее:  $m_{кап\ p} = 0,59 \cdot 10^{-7}$  (кг);  $P_{наг} = 0,093$  (Дж);  $P_{исп} = 0,53$  (Дж);  $P \approx 0,6 \cdot 10^3$  (Дж).

Эту энергию при скорости капель 5 м/с необходимо ввести за время  $t$ , определяемое как

$$t = \frac{l_p}{v_{кап}} = \frac{0,3}{5} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ (с)}, \quad (10)$$

откуда мощность СВЧ-излучения, вводимая в объемный резонатор, должна быть на уровне  $\sim 10$  кВт.

Несмотря на процессы, замедляющие испарение МК (тепловое излучение, отличие коэффициента конденсации от единицы и др.), в действительности следует ожидать меньшее значение энергии, необходимой для испарения МК, вследствие следующих неучтенных обстоятельств:

- взаимодействия микрокапель с заряженными частицами плазмы, приводящего к повышению температуры МК [23];

- нагрева заряженной компоненты плазменного потока вследствие взаимодействия ее с электромагнитными колебаниями;

- не успевшие испариться в зоне резонатора МК, но нагретые там до температуры кипения, испарятся после выхода из резонатора за очень короткое время (см. рис. 1);

- наличия большого количества МК нанометрового и субнанометрового размеров, которые испарятся в зоне транспортировки даже без ввода энергии.

Следует также отметить, что при движении капель через газовую среду возможно образование на их поверхности химических соединений металла капли с окружающим газом [24], приводящее к изменению по сравнению с чистым металлом физических характеристик поверхности капель.

## Выводы

В данной работе на основе простых оценок показана возможность устранения капельной фазы вакуумно-дугового разряда путем ее испарения при вводе СВЧ-энергии в зону ее транспортировки.

Выполнена оценка необходимой СВЧ-энергии для испарения капельной фазы титановой плазмы при токе дуги 100 А. Рассмотрены неучтенные при оценке факторы, которые могут приводить к снижению полученного значения.

Для реализации рассмотренной возможности необходимы дальнейшие как теоретические, так и экспериментальные исследования механизмов образования и транспортировки микрокапель, а также взаимодействия СВЧ-излучения с микрокаплями и плазмой вакуумно-дугового разряда,

## Литература

1. Аксенов, И. И. *Потоки частиц и массоперенос в вакуумной дуге: обзор [Текст] / И. И. Аксенов, В. М. Хороших. – М.: ЦНИИатоминформ, 1984. – 57 с.*
2. *Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифи-*

цирование [Текст] / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. А. Белоус и др. – Киев : Наукова думка, 2012. – 727 с.

3. Стрельницкий, В. Е. Пленки алмазоподобного углерода [Текст] / В. Е. Стрельницкий, И. И. Аксенов. – Харьков : ИПП «Контраст», 2006. – 344 с.

4. Белоус, В. А. Влияние параметров импульсной работы вакуумно-дугового испарителя на концентрацию капель в формируемых пленках [Текст] / В. А. Белоус, В. М. Лунев, В. С. Павлов // ВАНТ. – 2002. – №1(12). – С. 172–174.

5. Kourtev, J. A modified method for arc deposition of Ti-N thin films [Text] / J. Kourtev, R. Pascova, E. Weismantel // Vacuum. – 1997. – V. 48, No. 1. – P. 7–12.

6. Tai, C. N. Macroparticles on TiN films prepared by the arc ion plating process [Text] / C. N. Tai, E. S. Koh, K. Akari // Surf. Coat. Technol. – 1990. – V. 43–44. – P. 324–335.

7. Степанов, И. Б. Аксиально-симметричные фильтры жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции [Текст] / И. Б. Степанов // Технология машиностроения. – 2007. – № 5(59). – С. 44–51.

8. Аксенов, И. И. Вакуумно-дуговые источники фильтрованной плазмы [Текст] / И. И. Аксенов // Вакуумные технологии и оборудование. – Харьков : ННЦ ХФТИ, Константа, 2003. – С. 238–258.

9. Macroparticle distribution in a quarter-torus plasma duct of a filtered vacuum arc deposition system [Text] / M. Keidar, I. I. Beilis, R. Aharonov et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1997. – N 30. – P. 2972–2978.

10. Karpov, D. A. Cathodic arc sources and macroparticle filtering [Text] / D. A. Karpov // Surf. Coat. Technol. – 1997. – V. 96. – P. 22–33.

11. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.

12. Пат. Белоруссии 016703 ЕАПВ С23С 14/32. Устройство для очистки плазмы дугового испарителя от незаряженных микро- и макрочастиц [Текст] / А. К. Вершина, В. А. Агеев (ВУ) Заявитель и патентовладелец : Государственное научное учреждение «ФТИ АН Беларуси» (ВУ). – № а20081442 ; заявл. 14.11.2008 ; опубл. 30.06.2010.

13. Высокоэффективный источник чистой углеродной плазмы [Текст] / И. И. Аксенов, С. И. Вакула, В. Е. Стрельницкий и др. // ЖТФ. – 1980. – Т. 50, Вып. 9. – С. 200–203.

14. Положий, К. И. Подавление капельной фазы в вакуумно-дуговых распылительных системах [Текст] / К. И. Положий, В. М. Береснев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 5/2 (17). – С. 69–72.

15. Динамика капельной фазы в плазме дугового разряда низкого давления [Текст] / А. А. Бизюков, Е. В. Ромащенко, К. Н. Середа и др. // Вісник Харків. держ. ун-ту. – 2004. – № 642. – С. 42–46.

16. Дубровская (Прядко), Е. Л. Испарение капель катодного материала в плазме вакуумно-дугового отражательного разряда [Текст] : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.27.02 / Дубровская (Прядко) Елена Леонидовна; ИСЭ СО РАН. – Томск, 2012. – 29 с.

17. Панькин, Н. А. Влияние местоположения образца в межэлектродном пространстве на структуру и свойства TiN-покрытий [Текст] / Н. А. Панькин, Н. А. Смоланов // Поверхность. – 2006. – № 10. – С. 54–57.

18. Костюк, Г. И. Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г. И. Костюк. – Харьков : Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1. – 587 с.

19. Мрожек, Ж. А. Математическая модель нанесения покрытий вакуумным электродуговым методом [Текст] / Ж. А. Мрожек, Г. В. Марков, В. А. Эйзнер // Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц : П Всесоюз. конф. : тез. докл. – Свердловск : Уро АН СССР, 1991. – Т. 2. – С. 88–89.

20. Займан, Дж. Принципы теории твердого тела [Текст] / Дж. Займан. – М. : Высш. шк., 1974. – 478 с.

21. Физические величины [Текст] : справ. / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. ; под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

22. Божокин, С. В. Испарение капли жидкого металла под действием электромагнитного излучения [Текст] / С. В. Божокин, Е. А. Тараканов // ЖТФ. – 1993. – Т. 63, вып. 9. – С. 182–184.

23. Сысоев, Ю. А. Динамика температуры капельной фазы вакуумно-дугового разряда [Текст] / Ю. А. Сысоев, М. В. Гончаренко // Теплофизические процессы в технологии авиадвигателестроения : сб. науч. тр. «ХАИ». – Харьков, 1988. – С. 46–52.

24. Кинетика азотирования сферической высокотемпературной движущейся частицы титана [Текст] / К. И. Семенов, Л. А. Лялин, В. В. Калинин, Н. Х. Копыт // Физика аэродисперсных систем. – 2004. – Вып. 41. – С. 203–210.

## References

1. Aksenov, I. I., Horoshih, V. M. *Potoki chastic i massoperenos v vakuumnoj duge* [Particle flow and mass transfer in a vacuum arc]. Moscow, CNIAtom-inform. Publ., 1984. 57 p.
2. Aksenov, I. I., Andreev, A. A., Belous, V. A., Strel'nickij, V. E., Horoshih, V. M. *Vakuumnaja duga: istochniki plazmy, osazhdenie pokrytij, poverhnostnoe modifizirovanie* [Vacuum arc: plasma sources coating deposition, surface modification]. Kiev, Naukova dumka, Publ., 2012. 727 p.
3. Strel'nickij, V. E., Aksenov, I. I. *Plenki alma-zopodobnogo ugleroda* [Diamond-like carbon film]. Kharkov, IPP «Kontrast» Publ., 2006. 344 p.
4. Belous, V. A., Lunev, V. M., Pavlov, V. S. *Vlijanie parametrov impul'snoj raboty vakuumno-dugovogo isparitelja na koncentraciju kapel' v formiruemyh plenkah* [Effect of parameters of pulse operation vacuum arc evaporator in concentration drops which formed in films]. VANT – PAST, 2002, no. 1(12), pp. 172–174.
5. Kourtev, J., Pascova, R., Weismantel, E. A modified method for arc deposition of Ti-N thin films. *Vacuum*, 1997, vol. 48, no. 1, pp. 7–12.
6. Tai, C. N., Koh, E. S., Akari, K. Macroparticles on TiN films prepared by the arc ion plating process. *Surf. Coat. Technol.*, 1990, vol. 43–44, pp. 324–335.
7. Stepanov, I. B. Aksial'no-simmetpichnye fil'try zhaljuzijnogo tipa dli ochistki plazmy vakuumno-dugovogo pazpjada ot mikpokapel'noj frakcii [Filters with axial-symmetry of louver-type for cleaning of the plasma vacuum arc from fraction of drops]. *Tehnologija mashinostroenija*, 2007, no. 5(59), pp. 44–51.
8. Aksenov, I. I. Vakuumno-dugovye istochniki fil'trovannoj plazmy [Vacuum arc filtered plasma sources]. *Vakuumnye tehnologii i oborudovanie*. Kharkov, KIPT, Konstanta, Publ., 2003, pp. 238–258.
9. Keidar, M., Beilis, I., Aharonov, R. Macroparticle distribution in a quarter-torus plasma duct of a filtered vacuum arc deposition system *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1997, no. 30, pp. 2972–2978.
10. Karpov, D. A. Cathodic arc sources and macroparticle filtering. *Surf. Coat. Technol.*, 1997, vol. 96, pp. 22–33.
11. Aksenov, I. I. *Vakuumnaja duga v jerozionnyh istochnikah plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources]. Kharkov, KIPT. Publ., 2005. 212 p.
12. Vershina, A. K., Ageev, V. A. *Ustrojstvo dlja ochistki plazmy dugovogo isparitelja ot nezarjazhennyh mikro- i makrochastic* [Device for cleaner plasma arc evaporator uncharged micro and macroparticle]. Patent BY, no. 016703, 2010.
13. Aksenov, I. I., Vakula, C. I., Strel'nickij, V. E. Vysokoeffektivnyj istochnik chistoj uglerodnoj plazmy [Highly effective source of clean carbon plasma]. *Technical Physics*, 1980, vol. 50, no. 9, pp. 200–203.
14. Polozhij, K. I., Beresnev, V. M. Podavlenie kapel'noj fazy v vakuumno-dugovyh raspylitel'nyh sistemah [Suppression droplet phase in the vacuum-arc spray systems]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2005, no. 5/2 (17), pp. 69–72.
15. Bizjukov, A. A., Romashhenko, E. V., Sereda, K. N. Dinamika kapel'noj fazy v plazme dugovogo razrjada nizkogo davlenija [The dynamics of droplet phase in the plasma arc discharge of low pressure]. *Visnik Harkiv. universitetu*, 2004, no. 642, pp. 42–46.
16. Dubrovskaja (Prjadko), E. L. *Isparenie kapel' katodnogo materiala v plazme vakuumno-dugovogo otrazhatel'nogo razrjada* : avtoref. dis. na poluchenie stepeni kand. fiz.-mat. Nauk : spets. 05.27.02 «Vakuumnaja i plazmennaja jelektronika» [The evaporation of droplets of cathode material in the vacuum arc plasma discharge slinger]. Tomsk, 2012. 29 p.
17. Pan'kin, N. A., Smolanov, N. A. Vlijanie metopolozhenija obrazca v mezhelektroodnom prostanstve na strukturu i svojstva TiN-pokrytij [Effect of sample locations interelectrode space on the properties of TiN-coatings]. *Poverhnost'*, 2006, no. 10, pp. 54–57.
18. Kostjuk, G. I. Fizicheskie processy plazmenno-ionnyh, ionnoluchevykh, plazmennyh, svetoluchevykh i kombinirovannyh tehnologij. Fiziko-tehnicheskie osnovy nanesenija pokrytij, ionnoj implantacii i ionnogo legirovanija, lazernoj obrabotki i uprochnenija, kombinirovannyh tehnologij [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies. Physical and technical principles of coating, ion implantation and ion doping, laser processing and hardening, combined technologies]. Kharkov AINU. Publ., 2002. B. 1. 587 p.
19. Mrozhek, Zh. A., Markov, G. V., Jezner, V. A. Matematicheskaja model' nanesenija pokrytij vakuumnym jelektrodugovym metodom [Mathematical model of a vacuum arc coating method]. *Modifikacija svojstv konstrukcionnyh materialov puchkami zarjazhennyh chastic. II Vsesojuz. konf.*, Sverdlovsk, 1991, vol. 2, pp. 88–89.
20. Zajman, Dzh. *Principy teorii tverdogo tela* [Principles of solid state theory]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1974. 478 p.
21. Babichev, A. P., Babushkina, N. A., Bratkovskij, A. M., Grigor'ev, I. S. *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.
22. Bozhokin, S. V., Tarakanov, E. A. Isparenie kapli zhidkogo metalla pod dejstviem jelektromagnitnogo izluchenija [Evaporation of liquid metal droplets under the action of electromagnetic radiation]. *Technical Physics*, 1993, vol. 63, no. 9, pp. 182–184.

23. Sysoev, Ju. A., Goncharenko, M. V. Dinamika temperatury kapel'noj fazy vakuumno-dugovogo razrjada [The dynamics of the temperature drop phase vacuum arc discharge]. *Термофизические процессы в технологии авиадвигателестроения*, Sb. nauch. tr. «KhAI», Kharkov, 1988, pp. 46–52.

24. Semenov, K. I., Ljalin, L. A., Kalinchak, V. V., Kopyt, N. H. Kinetika azotirovanija sfericheskoj vysokotemperaturnoj dvizhushhejsja chasticy titana [Kinetics of high-temperature nitriding spherical titanium particles moving]. *Fizika ajerodispersnyh sistem*, 2004, vol. 41, pp. 203–210.

*Поступила в редакцию 15.01.2017, рассмотрена на редколлегии 15.03.2017*

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ УСУНЕННЯ КРАПЕЛЬНОЇ ФАЗИ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РОЗРЯДУ ВВЕДЕННЯМ ЕНЕРГІЇ У ЗОНУ ЇЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ

*Ю. О. Сысоев*

Коротко проаналізовано відомі методи зниження кількості мікрокрапель у вакуумно-дугових покриттях. Показано, що вони не дозволяють повністю усувати мікрокраплі з плазмового потоку. Розглянуто можливість усунення крапельної фази вакуумно-дугового розряду шляхом її випаровування при введенні СВЧ-енергії в зону її транспортування. Запропоновано вакуумно-дуговий пристрій для реалізації цього методу. Виконано оцінювання необхідної СВЧ-енергії для випаровування крапельної фази титанової плазми при струмі дуги 100 А. Розглянуто невраховані при оцінюванні фактори, які можуть призводити до зниження отриманого значення.

**Ключові слова:** вакуумно-дуговий розряд, іонно-плазмові технології, крапельна фаза вакуумно-дугового розряду, СВЧ-енергія.

## ABOUT POSSIBILITY OF ELIMINATION MICRODROPLETS OF VACUUM ARC OF INPUT ENERGY INTO THE ZONE OF THEIR TRANSPORTATION

*Iu. A. Sysoiev*

Briefly reviewed the known methods of reducing the amount of microdroplets in a vacuum arc coatings. It has been shown that they do not allow to completely eliminate the microdroplets of the plasma stream. The possibility of removing the drip phase vacuum arc discharge by evaporation it when entering the microwave energy in its transportation zone was considered. Vacuum arc apparatus for implementing this method was proposed. The estimation of microwave energy required to evaporate droplets of titanium at a current of arc 100 A was done. Unaccounted the factors that can lead to lower of obtained value were considered.

**Key words:** vacuum arc discharge, ion-plasma technologies, microdroplets of vacuum arc, the microwave energy.

**Сысоев Юрий Александрович** – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ju-as@yandex.ua.

**Sysoiev Iurii Aleksandrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: ju-as@yandex.ua.