

## УДК 67.05

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОПЛА ДЛЯ УСТАНОВКИ МЕТАЛИЗАЦИИ МЕТОДОМ ПАРОСТРУЙНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Сергей Сергеевич Бланк, Виктор Юрьевич Здоровьев, Санта Витальевна Степаненко

Студенты 4 курса

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л.Л. Колесник,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Пароструйное осаждение является комбинацией химического и физического осадений. Как и при физическом осадении молекулы материала формируются на удалении от подложки и двигаются прямолинейно в ее сторону. Однако движение молекул происходит в струе рабочего газа. Давление в камере при этом существенно ниже атмосферного, но выше, чем при традиционных методах физического осадения покрытий. В качестве рабочих газов-носителей используются инертные газы: гелий, аргон.

Основным технологическим признаком метода пароструйного осаждения является наличие сверхзвуковой струи газа, которая доставляет атомы, молекулы или даже капли материала к подложке и обеспечивает их эффективное осаждение [1]. Схема устройства источника пароструйного осаждения с термическим испарителем показана на рисунке 1 [2].

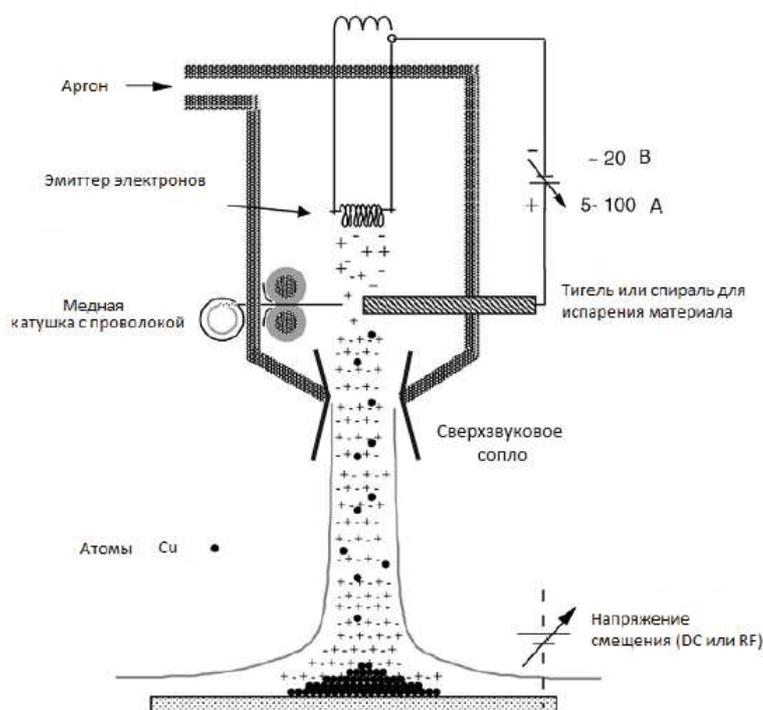


Рис. 1. Пароструйное осаждение

Тонкая проволока материала непрерывно подается в зону, нагреваемую с помощью спирали, сделанной из вольфрама. При контакте проволоки с нагревателем она расплавляется, смачивает спираль и начинает испаряться. Испаряющиеся атомы материала увлекаются потоком газа в сторону сопла, проходят через него и осаждаются на подложке в виде окружности.

Бомбардировка подложки высокоэнергетическими ионами аргона позволяет решить две задачи: предварительную очистку и активацию поверхности подложки; дополнительную обработку растущей пленки. Такое решение позволяет обойтись без отдельного источника ионов для очистки подложки перед нанесением.

Лабораторная установка по нанесению покрытий методом пароструйного осаждения состоит из нескольких вакуумных камер. Фотография установки приведена на рисунке 2.



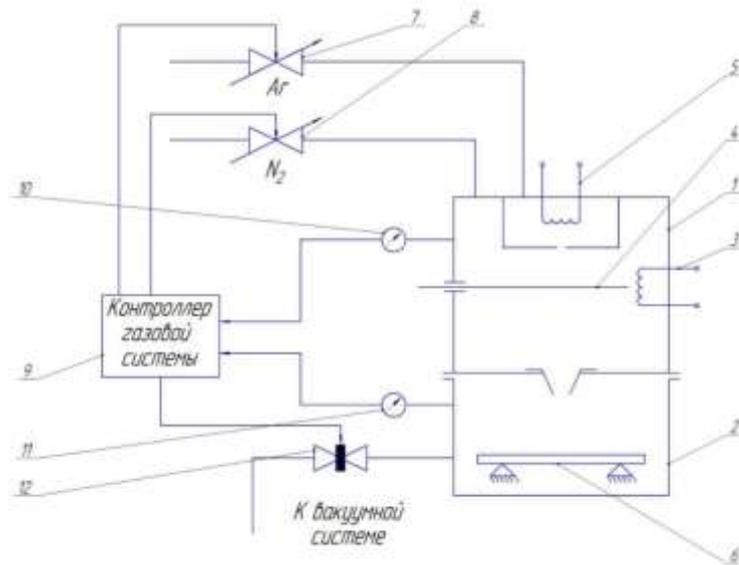
Рис. 2. Фотография установки

Самая верхняя – камера механизма подачи проволоки. В ней расположена катушка проволоки, непрерывно подающей в камеру испарителя.

Далее расположена камера испарителя. В этой камере расположена спираль, испаряющая проволоку, подаваемую через трубку в середине камеры. Спираль крепится на токовводы, на которые подается напряжение и располагается максимально близко к соплу.

В нижней камере расположен предметный столик, на котором располагается подложка. Предметный столик установлен на вводе вращения. Через эту камеру ведется откачка системы.

Схема управления системой подачи газа и регулирования давления приведена на рисунке 3.



1 – технологический источник, 2 – вакуумная камера, 3 – спираль испарителя, 4 – испаряемый материал, 5 – спираль ионизатора, 6 – подложка, 7 – регулятор расхода рабочего газа (аргон), 8 – регулятор расхода рабочего газа (азот), 9 – контроллер газовой системы, 10 – датчик давления в технологическом источнике, 11 – датчик давления в вакуумной камере, 12 – диафрагмирующий клапан  
Рис. 3. Схема системы подачи газа и регулирования давления

В настоящее время поток газа проходит через стандартное коническое сопло, фотография которого приведена на рисунке 4. Скорости нанесения покрытий с использованием данного сопла не превышают 100 нм/мин.

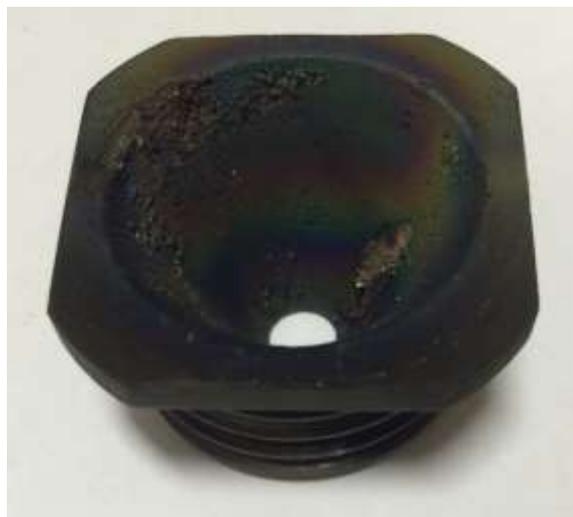


Рис. 4. Стандартное сопло

Для усовершенствования процесса пароструйного осаждения было разработано новое сопло, взамен стандартному, которое представляет собой коническое отверстие, сужающееся книзу. Модернизированное сопло является так называемым соплом Лавала, скорость истечения из которого превышает скорость звука. Это значительно увеличивает скорость нанесения покрытия данным методом. Далее представлен расчет геометрии сопла на основании источника [3].

Условные обозначения, используемые в расчете:

- а - скорость звука, м/с;

- $d$  - диаметр, м;
- $f$  – площадь, м<sup>2</sup>;
- $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение силы тяжести;
- $G$  - массовый расход, кг/с;
- $k = C_p/C_v$  - показатель адиабаты;
- $l$  - длина до оси сопла, м;
- $P$  – давление, Па;
- $R$  - газовая постоянная, Дж/(кг\*К);
- $T$  – температура, К;
- $v$  - удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;
- $w$  - скорость, м/с;
- $\alpha$  - угол раскрытия сопла, град;
- $\beta$  - перепад давления;
- $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>.
- Безразмерный комплекс
- $M=w/a$  - число Маха, характеризует сжимаемость потока газа.
- Индексы
- 1 - расширяющаяся часть сопла;
- 2 - сужающаяся часть сопла;
- вх - входное сечение;
- вых - выходное сечение;
- кр - критическое значение;
- $i$  - значение в  $i$ -м сечения сопла.

Для расчета геометрии сопла необходимо:

1) Определять изменение параметров потока по длине сопла: давления  $P$ , температуры  $T$ , удельного объема  $v$ , плотности  $\rho$ .

2) Определить изменения по длине сопла: скорости потока  $w$ , местной скорости звука  $a$ , числа Маха  $M$ .

3) Определить геометрические размеры сопла: длину  $l$ , критический диаметр  $d_{кр}$  (диаметр горловины), диаметр на входе  $d_{вх}$  диаметр на выходе  $d_{вых}$ .

Расчет истечения начинают с определения области течения, которая может быть дозвуковой, звуковой, сверхзвуковой. Ее находят сравнением перепада давления с критическим перепадом.

Чтобы эта возможность стала действительностью, необходима соответствующая форма сопла. Канал, в котором достижима сверхзвуковая скорость, называется соплом Лавала (по имени шведского инженера, предложившего это сопло для получения сверхзвуковой скорости в струе пара, работающей в турбине).

Сопло Лавала состоит из сужающейся и расширяющейся частей. В сужающейся части скорость увеличивается от начального значения (если истечение происходит из большого сосуда,  $w=0$ ) до скорости, равной местной скорости звука; в расширяющейся части наблюдается дальнейшее увеличение скорости потока. Минимальное сечение – это горловина, в которой достигается скорость движения потока, равная скорости звука, называется критическим сечением, а параметры газа - критическими.

Режим течения определяется сравнением перепада давлений  $\beta_i = \frac{P_i}{P_0}$  с критическим перепадом

$$\beta_i = \frac{P_i}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

где  $P_i$ ,  $P_{кр}$  - статическое давление в  $i$ -м и критическом сечениях;  $P_0^*$  - полное давление на входе в сопло;  $k$  - показатель адиабаты.

Последовательность расчёта

1) Перепад давления в сопле  $\beta_{\text{вых}} = P_{\text{вых}}/P_0^* = 0,01$

если:  $\beta_{\text{вых}} < \beta_{\text{кр}}$ , режим истечения струи из сопла - сверхзвуковой.

$\beta_{\text{вых}} < \beta_{\text{кр}}$ , следовательно режим истечения струи сопла – сверхзвуковой

2) Для расчета параметров газа в промежуточных сечениях сопла задаться текущими значениями  $\beta_i$  в диапазоне  $1 \geq \beta_i \geq \beta_{\text{вых}}$

3) Определение параметров на выходе сопла:

а) давление  $P_i = \beta_i/P_0^* = 10^{-2}$  Па

б) температура  $T_i = T_0^* \cdot \beta_i^{\frac{k-1}{k}} = 330$  К

в) удельный объем находится с помощью уравнения состояния идеального газа:

$$v_i = \frac{R \cdot T_i}{P_i} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ см}^3/\text{г}$$

г) плотность (величина, обратная удельному объему):  $\rho_i = \frac{1}{v_i} = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ г}/\text{см}^3$

5) Скорость потока

$$w_i = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot R \cdot (T_0^* - T_i)} = 960 \text{ м}/\text{с}$$

6) Местная скорость звука

$$a_i = \sqrt{k \cdot R \cdot T_i} = 285 \text{ м}/\text{с}$$

7) Число Маха - отношение скорости потока к скорости звука в нем:  $M_i = \frac{w_i}{a_i}$ ; отсюда

$M < 1$  - дозвуковой поток;  $M = 1$  - звуковой поток;  $M > 1$  - сверхзвуковой поток.

8) Геометрические размеры сопла:

При расчете было принято  $G = 5 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/\text{с}$

$$\text{Площадь сопла в сечении } f_2 = \frac{G}{\rho_i \cdot w_i} = 794 \text{ мм}^2$$

$$\text{Диаметр: } d_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot f_2} = 31,8 \text{ мм}$$

Длина дозвуковой части:

$$l_{\text{дi}} = \frac{d_i - d_{\text{кр}}}{2 \cdot \text{tg}(\alpha_2/2)} = 50 \text{ мм}$$

Длина сверхзвуковой части:

$$l_{\text{сi}} = \frac{d_i - d_{\text{кр}}}{2 \cdot \text{tg}(\alpha_1/2)} = 50 \text{ мм}$$

По результатам расчета было спроектировано сопло, фотография которого представлена на рисунке 5.



Рис. 5. Фотография спроектированного сопла

Помимо увеличения скорости осаждения материалов пароструйным методом сверхзвуковое сопло позволяет получать кластеры.

Кластеры представляют собой совокупность атомов (от нескольких единиц до нескольких тысяч). Они интересны тем, что являются переходным звеном между отдельным атомом и твердым телом. Их свойства могут существенно отличаться от свойств твердого тела.

Кластеры интенсивно исследуют и применяют в различных областях, включая химию, медицину, электронику и нанотехнологии. Использование нанотехнологий в области электронных устройств позволит создать приборы, основанные на новых физических принципах. Так, например, применение эффекта кулоновской блокады, а именно, блокирование прохождения электрона через квантовую точку, при комнатных температурах требует получение пленок с малыми частицами порядка 1 нм. Таким образом, атомные кластеры предлагают один из путей в развитии одноэлектронных приборов.

Основные характеристики кластерных пучков:

- 1) их интенсивность (плотность массового потока)
- 2) функция распределения кластеров по скоростям
- 3) средняя скорость потока
- 4) распределение кластеров по размерам в пучке

Одним из важных моментов в работе большинства кластерных источников являются характеристики газовой струи. Для источников со сверхзвуковым расширением необходимо, чтобы была возможность конденсации и происходило дальнейшее формирование кластеров. Поэтому Кантровиц и Грэй предложили использовать в качестве источника аэродинамическое сопло. Их идея состояла в том, чтобы отбирать свободномолекулярный поток не из покоящегося газа, а из газа разогнанного в сопле конической формы.

Не существует какой-либо точной теории, которая предсказывает образование и рост кластеров. Один из подходов для анализа кинетики образования и роста кластеров описали Хагена и Оберт [4]. Они показали, что самый эффективный рост кластеров происходит при увеличении давления  $p_0$ , уменьшении температуры  $T_0$  и увеличении диаметра сопла  $d$ . Но не было точной закономерности между размерами кластера и значениями этих параметров. Позже Хагена получил полуэмпирический закон подобия, описывающий кластерное формирование. Для этого ввели особый параметр  $\Gamma$ , который показывает, будут ли сформированы кластеры и какого размера:

$$\Gamma^* = \frac{n \cdot d^{0.85} \cdot p_0}{T_0^{2.29}}$$
, где  $n$  – параметр конденсации, который зависит от типа газа  
(Для Ar  $n = 1650$ );

$d$  – диаметр сопла, мкм;

$T_0$  – температура газа до расширения (при н.у.  $T_0 = 293\text{K}$ );

$p_0$  – давление на входе в сопло, мбар.

Значения  $\Gamma^*$  до 200 означают, что кластеры не образуются. Диапазон значений  $\Gamma^*$  от 200 до 1000 говорит о начале образования газодинамических кластеров инертных газов и паров металлов. Если  $\Gamma^*$  выше 1000 то начинается массовое кластерообразование.

Чтобы определить необходимое соотношение давлений для достижения сверхзвуковой скорости и образования кластеров были проведены эксперименты с различной скоростью подачи газа. Изменение перепада давления при повышении начального давления показаны на рисунке 6.

$\beta_i P_0$

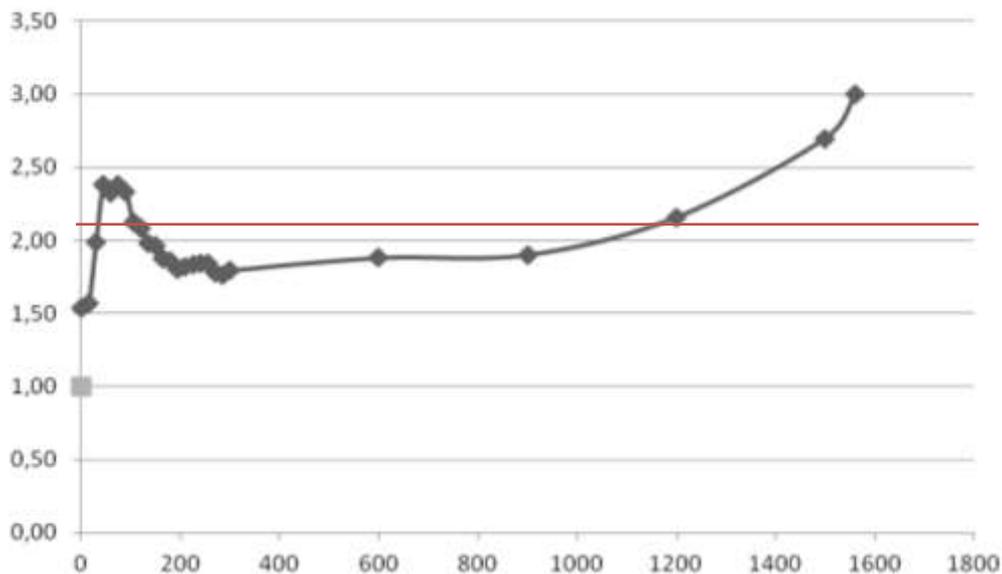


Рис. 6. График изменения перепада давления с увеличением давления на входе.

Для данных условий:

Расширяемый газ – Ar,  $k(\text{Ar})=5/3$ ,

$$\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 2,06$$

Следовательно при перепаде давлений выше 2,06 будет достигаться сверхзвуковая скорость (Граница перепада давлений, при которой начинается сверхзвуковая скорость показана красной линией на рисунке 6).

Но для образования кластеров необходимо, чтобы параметр  $\Gamma^*$  был в диапазоне от 200 до 1000. В проведенных экспериментах параметр  $\Gamma^*$  ниже 200. Это означает, что образование кластеров не происходит.

Для перехода в режим кластерообразования необходимо увеличивать скорость подачи газа.

## Литература

1. Баданова Н.В. Способ металлизации керамических подложек // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии».
2. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / ed. by P.M.Martin. - 3rd ed. – Burlington; Oxford: William Andrew / Elsevier, 2010. – xviii, 912 p.: ill. Bibliogr. at the end of the chapters. – Ind.: p.902-912. – ISBN 978-0-8155-2031-3.

3. Техническая термодинамика: Учебник для вузов / Под ред. В.И.Крутого, - М.: Высшая школа. 1981. - 439 с.
4. *Карпенко А.Ю., Батурин В.А.* Формирование кластерных пучков в сопловых источниках // Журнал Нано- и Электронной физики. 2012. №4. С. 15-30.