

насоса. Другим вариантом снижения потребляемой мощности может быть установка разгрузочного клапана, снижающего давление в области пережатия до перемещения газа в область выхлопа в атмосферу.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Современное состояние рынка безмасляных форвакуумных средств откачки / И. В. Ануфриева, Ю. К. Васильев, В. Н. Кеменов, С. Б. Нестеров, Т. С. Строгова // Вакуумная техника и технология. – 2003. - Т.13, № 2. - С. 93-99.

2. Edwardsn XDS - the great new shape of dry vacuum pumping [Электронный ресурс] /Edwards Ltd.- United Kingdom.: Edwards Ltd,2013. – Режим доступа: [http://www.edwardsvacuum.com/nxds/en/index.html?cmpid=HomepageLink\\_nXDS0412](http://www.edwardsvacuum.com/nxds/en/index.html?cmpid=HomepageLink_nXDS0412), свободный.

3. Ilmvac scroll pumps operation manual [Электронный ресурс] /ILMVAC GmbH.- Germany.: ILMVAC GmbH, 2020. – Режим доступа: [https://www.idealvac.com/files/manualsII/Welch\\_Ilmvac\\_S15\\_And\\_S10\\_ScrollVac\\_Manual.pdf](https://www.idealvac.com/files/manualsII/Welch_Ilmvac_S15_And_S10_ScrollVac_Manual.pdf), свободный.

4. Бурмистров А.В. Математическая модель рабочего процесса безмасляного спирального вакуумного насоса / А. В. Бурмистров, С. И. Саликеев, А. А. Райков, А.В. Тюрин, Р. Р. Якупов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2018, – № 6 (123). - С.103-113.

5. Burmistrov, A. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump : Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics / Burmistrov A., S. Salikeev, Raykov A., M. Fomina // Vakuum in Forschung und Praxis. - 2017. - Vol. 29. - Is. 6. – P. 28-31.

## **МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ**

### **VACUUM METALLIZATION OF DUST MATERIALS**

**Ю.В.Панфилов**

**Yu.V.Panfilov**

МГТУ им Н.Э. Баумана, г. Москва

*Описаны и проанализированы методы нанесения тонкопленочных металлических покрытий на порошковые материалы. Приведены схемы металлизации порошков методом магнетронного распыления, с помощью пылевой плазмы и методом осаждения из газовой фазы.*

*Methods for applying thin-film metal coatings on powder materials are described and analyzed. Schemes for metallization of powders by magnetron sputtering, dusty plasma, and vapor deposition are presented.*

Ключевые слова: *тонкопленочные металлические покрытия, металлизация порошков, пылевая плазма*

Key words: *thin-film metal coatings, metallization of powders, dusty plasma.*

До недавнего времени потребность в металлизированном порошке была связана в основном с алмазным инструментом для обработки труднообрабатываемых материалов. С

появлением аддитивных технологий возникла необходимость в металлизации порошков из различных материалов, что способствует повышению качества деталей, получаемых 3D печатью.

В статье представлены результаты обзора методов нанесения тонкопленочных покрытий на порошковые материалы, полученные из анализа литературных и патентных источников.

На рис. 1 показана схема металлизации порошка магнетронным методом, при котором распыляемый материал осаждается на частицы порошка, находящиеся в псевдосжиженном состоянии в вибробункере, чаша которого совершает вращательное движение и возвратно-поступательные колебания [1].

Частота вращения чаши составляет 5 – 20 об/мин., агрегация порошков с размерами от 20 нм до десятков микрометров практически отсутствует, покрытия из Cu, Ni, Sn и других металлов наносятся магнетронным методом. Получаются сплошные металлические покрытия, имеющие толщину 0,05 – 5 мкм. и составляющие по весу от 15 до 60% от общего веса порошка с покрытием. Откачка производится с помощью механического и диффузионного паромасляного насосов до  $10^{-3}$  Па. Натекателем устанавливается давление аргона  $3 \cdot 10^{-1}$  Па.

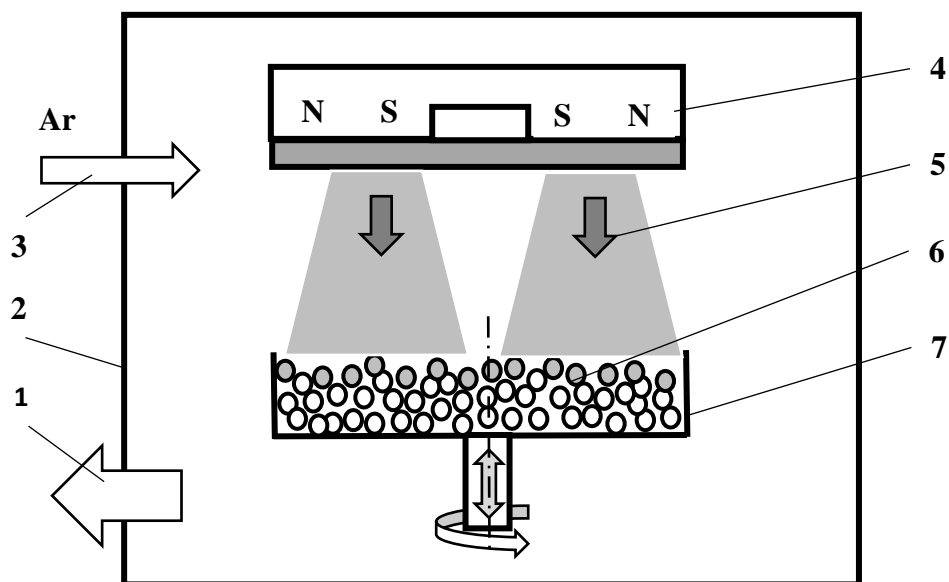


Рис. 1. Схема металлизации порошка магнетронным методом: 1 – откачка камеры, 2 – вакуумная камера, 3 – напуск рабочего газа, 4 – магнетрон, 5 – поток распыляемого материала, 6 – обрабатываемый порошок, 7 – чаша вибробункера.

Основными задачами установки для металлизации порошка являются:

- повышение равномерности и однородности строго дозированного покрытия на частицах порошка;
- исключение агрегации частиц порошка за счет повышения интенсивности перемешивания;
- обеспечение загрузки порошка в чашу вибробункера и его выгрузки без разгерметизации вакуумной камеры.

Еще одним методом получения взвешенных частиц порошка может служить пылевая плазма [2], которая является многокомпонентной средой, состоящей из ионизованного газа и заряженных пылинок микроскопического размера. Типичными параметрами разряда являются давление нейтрального газа от 1 до 10 Па, а также ионные и электронные плотности – порядка  $10^8 - 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Энергия электронов обычно составляет 1 – 7 эВ, а энергия ионов и атомов нейтрального газа обычно близки к комнатной температуре 0,025 – 0,03 эВ.

В качестве пылевой компоненты используются порошковые материалы сферической формы с радиусом от 0,5 до 30 мкм, которые, благодаря высокой подвижности электронов, могут заряжаться до  $10^3 - 10^5$  элементарных зарядов. На электроды через согласующее устройство подается напряжение от генератора с несущей частотой 13,56 МГц, в результате чего в вакуумной камере возникает высокочастотный емкостной разряд. Мощность, закачиваемую высокочастотным генератором в разряд между электродами, можно изменять от 1 до 100 Вт. В таких условиях частицы формируют пылевую структуру в приэлектродной области ВЧ разряда с числом частиц не менее 2500-3000.

Разновидности метода пылевой плазмы для нанесения покрытий на порошки описаны в [3]. На рис. 2 приведена схема нанесения покрытия на порошок с раздельным удержанием частиц порошка и распыления металла.

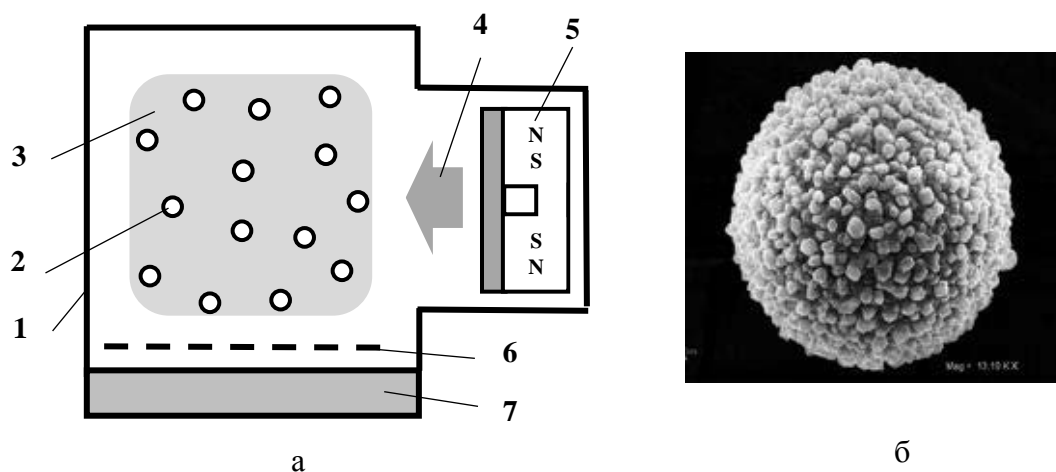


Рис. 2. Схема нанесения (а) покрытия на порошок с раздельным удержанием частиц порошка и распыления металла и фотография частицы порошка (б): 1 – вакуумная камера, 2 – частицы порошка, 3 – пылевая плазма, 4 – поток осаждаемого материала, 5 – магнетрон, 6 – ВЧ электрод, 7 – диспергатор.

С помощью диспергатора 7 в вакуумную камеру 1 подаются частицы порошка, которые заряжаются от ВЧ электрода 6 и находятся во взвешенном состоянии, образуя пылевую плазму 3. Магнетрон 5 генерирует поток атомов металла 4, которые равномерно осаждаются на частицы порошка 2. Удельная мощность распыления составляет  $50 \text{ Вт/см}^2$ , расстояние от мишени магнетрона до пылевой плазмы 20 см, диапазон давлений 0,07 – 0,13 Па характерен для образования объемного пылевого облака из частиц микронных размеров и нанесения на них покрытия методом магнетронного распыления. Метод апробирован для нанесения кобальта и никеля толщиной до десятков нанометров на частицы алмазного порошка.

Наиболее простой реализацией процесса металлизации порошковых материалов с помощью пылевой плазмы можно считать удержание частиц и распыление металла в плазме магнетронного ВЧ разряда [3] (рис. 3). При работающем магнетроне в область высокочастотного разряда подаются частицы порошка, которые образуют пылевую плазму и на которые наносится тонкопленочное покрытие. Удельная мощность распыления составляет  $0,5 \text{ Вт/см}^2$ , расстояние от мишени магнетрона до области пылевой плазмы 0,2 см, диапазон давления аргона 0,07 – 0,13 Па.

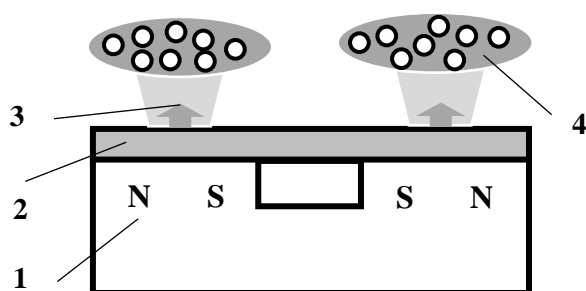


Рис. 3. Схема нанесения покрытия на порошок с удержанием частиц и распылением металла в плазме магнетронного ВЧ разряда: 1 – магнитная система, 2 – распыляемый ВЧ электрод, 3 – поток распыляемого материала, 4 – пылевая плазма.

К недостаткам этого метода можно отнести необходимость периодической остановки процесса для сбора и удаления из вакуумной камеры металлизированного порошка.

Для металлизации порошковых материалов используется также метод осаждения из газовой фазы [4]. Сущность метода (рис. 4) заключается в засыпке порошка в ёмкость 6, разогреве порошка до температуры разложения легколетучего соединения металла, пересыпании порошка в реактор 3, в который подается газовая смесь, содержащая осаждаемые на порошок компоненты, и сборе металлизированного порошка в бункере 1.

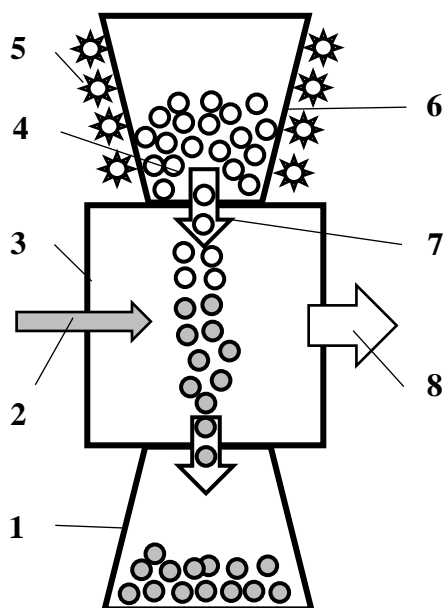


Рис. 4. Схема газовой металлизации порошка: 1 – бункер с металлизированным порошком, 2 – напуск рабочего газа, 3 – реактор, 4 – исходный порошок, 5 – нагреватель, 6 – ёмкость с исходным порошком, 7 – дозатор-рассеиватель, 8 – откачка реактора.

К достоинствам метода относится равномерное и однородное покрытие порошкового материала и микросфер металлом, а к недостаткам – необходимость использования металлоорганических соединений, многие из которых являются токсичными, а также, более дорогая и сложная вакуумная и газовая система в коррозионно-стойком исполнении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <https://findpatent.ru/patent/234/2344902.html>
2. Фортов В.Е., Петров О.Ф., Нефедов А.П. и др. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда / Письма в ЖЭТФ, Т. 64(2), 1996, С. 86 – 91.
3. A.G. Rudavets, A.N. Ryabikin, and A.O. Serov, Plasma Processes and Polimers, 2011. 8(4): p. 346-352
4. <https://findpatent.ru/patent/230/2307004.html>
5. Устройство для нанесения покрытия на порошки:
6. <https://findpatent.ru/patent/234/2344902.html>
7. Оборудование и технология для получения покрытий методом вакуумной металлизации на порошках и гранулах. Авторы: Клебанов Ю.Д., Васильчикова Н.М. М., НИИиформтяжмаш, 1977, №30, с.8, 9, 16-20, 22, 36. Патент РФ №2082554, опублик. 27.06.1997.
8. Способ перемешивания порошков патент РФ №2250764, опублик. 27.04.2005
9. Ветчинин С. П. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 19. С. 35.
10. Русанов С. А. // Вестник НТУУ «Киевский политех». 2009. № 57. С. 116.
11. 3. Ivanov A.S., Pal A. F., Ryabinkin A. N. et al. // Plasma Processes and Polymers. 2005. V. 2. P. 455.
12. Найдич Ю. В. Уманский В.П.Лавриненко И.А. Исследование адгезионных свойств хромовых покрытий на поверхности алмаза и графита // Алмазы и сверхтвердые материалы. 1980. N 12.С.1-4.
13. Найдич Ю. В. Уманский В.П.Лавриненко И.А. Исследование прочности сцепления алмаза с металлом //Сверхтвердые материалы. 1984, N 6. С. 19-23.
14. Металлизация алмазов для буровых коронок /С.А. Ашинов, З.Ж. Беров, Н. И. Корнилов и др. М. 1989. 27 с.
15. Дуда Т. М. Взаимодействие на границах контакта алмаз-покрытие-вязка//Сверхтвердые материалы. 1986. N 5. С. 30-33.
16. Гришачев В. Ф.Маслов В.П.Весна В.Т. и др. Нанесение титановых покрытий на алмазы из газовой фазы//Алмазы и сверхтвердые материалы. 1981. N 7. С. 1-3.