

Установлено, что скорость механического перемешивания электролита наиболее заметно проявляется при электрокристаллизации таких металлов как титан, вольфрам и сплавов на их основе, в частности, титан–алюминий, Вольфрам–кобальт, вольфрам–железо, вольфрам–хром, а также сплавов железо–молибден, молибден–кобальт, железо–никель–хром из водных растворов простых солей.

По результатам проведённых исследований установлено, что при осаждении композиционных покрытий на железоуглеродистых сплавах необходимо обеспечить оптимальное сочетание параметров процесса, которое определяется составом формируемого слоя. В этом случае возможно обеспечить эффективное упрочнение поверхности изделий при восстановлении изношенных деталей и достичь микротвердости порядка 15–18 ГПа.

621.79

### **УЗЕЛ КОЛЬЦЕВОГО ВВОДА ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОТОК ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ**

В.И. Кузьмин<sup>1</sup>, А.А. Михальченко<sup>1</sup>, Е.В. Картаев<sup>1</sup>, Н.А. Руденская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно–технологический парк БНТУ «Политехник»  
г. Минск, Республика Беларусь

Основным способом подачи обрабатываемых дисперсных материалов в поток термической плазмы является точечный поперечный ввод [1,2]. Указанный способ транспортировки порошков вносит существенные возмущения в несущий поток. Возникающая при этом неоднородность полей температуры и скорости в струе плазмы приводит к появлению в её сечениях частиц, имеющих существенные отличия по тепловой и кинетической энергии и даже находящихся в различных агрегатных состояниях. А это значительно снижает качество покрытий при плазменном напылении. Кроме того, локальный точечный ввод характеризуется предельно низким к.п.д. использования энергии плазменной струи, который обычно не превышает 6% [3].

На наш, взгляд для получения осесимметричного высокотемпературного гетерогенного потока перспективным является использование узла кольцевого ввода обрабатываемого порошкового материала. В этом случае осесимметричный радиально–сходящийся поток частиц непосредственно за зоной анодной привязки дугового разряда позволит существенно увеличить эффективность взаимодействия потока плазмы с обрабатываемым материалом. Как показывают теоретические расчёты [4], использование узла кольцевого ввода позволяет

увеличить, по сравнению с односторонним точечным, эффективность нагрева частиц и максимальную производительность обработки более чем на порядок.

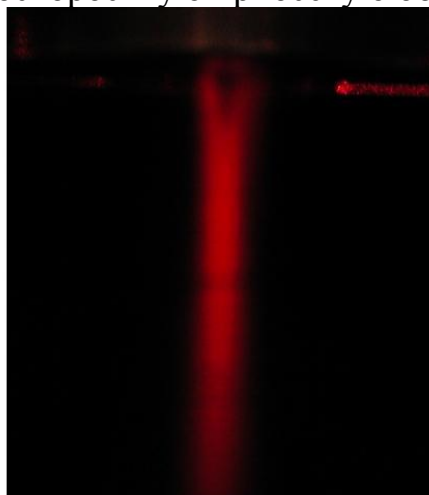
Первые публикации по использованию узлов распределённого ввода, где описана подача дисперсного материала в плазменный поток по кольцевой щели, появились более 20 лет назад. Так, в работе [5] приведена схема оригинального устройства, содержащего, помимо кольцевой щели (для ввода порошкового материала), дополнительную кольцевую щель, предназначенную для подачи фокусирующего газа.

Несомненная перспективность распределённого ввода порошков через кольцевую щель и существование ряда нерешённых проблем (организация устойчивого равномерного распределения частиц по кольцевой щели, зарастание щели налипшими частицами и продуктами эрозии анода) инициировали разработку оригинального узла кольцевого ввода. С использованием результатов [5] нами разработано оригинальное устройство и новый способ равномерного распределения порошка по периметру кольцевой щели.

Визуализация гетерогенного потока (рисунок1), выполненная при помощи лазерного ножа, иллюстрирует чёткую фокусировку и формирование плотного осесимметричного течения при холодной продувке с подачей порошка, транспортирующего и фокусирующего газов.

Конструкция узла кольцевого ввода спроектирована под разработанный ранее электродуговой плазмотрон постоянного тока номинальной мощностью 50 кВт. На сегодняшний день проведены испытания и выполнена серия экспериментов с узлом кольцевого ввода для термообработки (в частности напыления) керамических порошков. В качестве рабочего газа (плазмообразующего, защитного, транспортирующего, фокусирующего) использовали воздух.

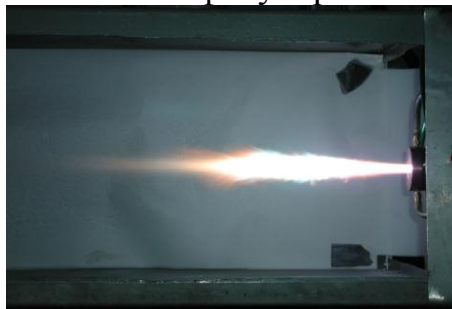
Фотографии высокотемпературных гетерогенных потоков и порошка  $Al_2O_3$  (40 мкм) до обработки (исходный) и после обработки в плазменной струе (при кольцевом и точечном вводе порошка) представлены на рисунок2, из которого видно, что, в отличие от точечного ввода, кольцевой ввод с газодинамической фокусировкой обеспечивает плотный осесимметричный гетерогенный поток. При оптимальном режиме все частицы порошка должны проходить через высокотемпературную и высокоскоростную приосевую область плазменной струи.



### Рисунок 1 – Формирование гетерогенного потока при холодной продувке.

В ходе эксперимента порошок вводили в плазменную струю и на дистанции около 1,5 метра от среза сопла собирали его в воду. По степени сфероидизации оценивали эффективность нагрева (плавления) частиц. На рисунке 2 представлены фотографии порошков, обработанных в следующих условиях: ток дуги – 200А; напряжение на дуге – 250 В; расход плазмообразующего газа –  $1,5 \cdot 10^{-3}$  кг/с; расход  $Al_2O_3$  – 2 кг/час.

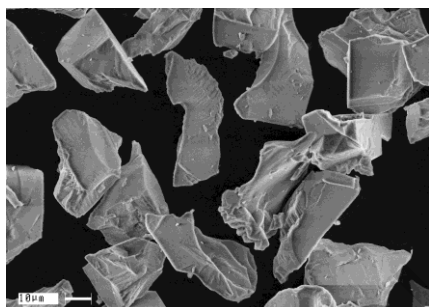
Кольцевой ввод порошка с газодинамической фокусировкой



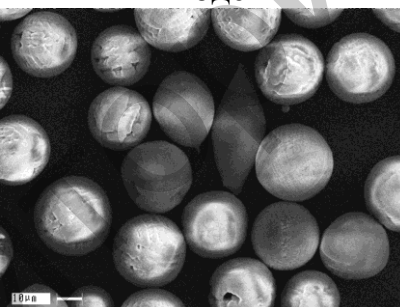
Точечный ввод порошка



Исходный порошок  $Al_2O_3$



После плазменной обработки при кольцевом вводе



После плазменной обработки при точечном вводе

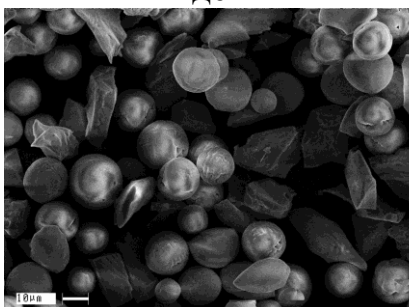


Рисунок 2 – Сравнение эффективности обработки при кольцевом и точечном вводах порошка

Приведённые фотографии иллюстрируют преимущества кольцевого ввода порошка (степень сфероидизации частиц близка к 100%). Как правило, при точечном вводе порошка напыление керамических покрытий плазмотронами мощностью до 50 кВт проводят при небольших расходах плазмообразующего газа (до 1 г/с), так как для полного проплавления материала необходимо увеличивать время пребывания тугоплавких (с низким коэффициентом теплопроводности) частиц порошка в плазменном потоке. Преимущества представляемого метода можно проследить и из следующего сравнения: при использовании дугового секционированного плазмотрона для сфероидизации керамических порошков выход сферического продукта  $Al_2O_3$ , близкий к 95%, получают при режимных параметрах по току и напряжению соответственно 800 А и 100 В; производительность процесса в этом случае составляет около 3 кг/час, кроме того, значительны расходы аргона и азота, как плазмообразующего и транспортиру-

ющего газов. Сфероидизация частиц в плазменном потоке – чрезвычайно важный процесс, снижающий остаточную пористость напыленных слоев, повышающий адгезионную прочность и одновременно модифицирующий их структуру, химический и фазовый состав. Использование узла кольцевого ввода частиц в плазменный поток с увеличением расхода плазмообразующего газа (1,5 г/с и более) позволяет достичь их полного проплавления. Вместе с этим существенно возрастает скорость напыляемого материала. Реализация таких условий при формировании покрытий обеспечивает их высокое качество с варьированием состава в широком диапазоне. Особо следует отметить возможность получения покрытий, как со слоевыми, с композиционными, так и с комбинированными структурами, что делает метод универсальным в плане создания многофункциональных покрытий различного назначения.

### Литература

1. Beretta F.E., Vassallo E. Design criteria for integrated injection systems in a d.c. plasma source // Proc. 14th Int. Symposium on Plasma Chemistry, Prague, Czech Republic, August 2–6, 1999, Vol V 2429–2434 (1999).
2. P. Fauchais. Understanding Plasma Spraying//J. Phys. D Appl. Phys., 2004, 37(9), p R86–R108.
3. В.С. Клубникин. Электротермические плазменные устройства и процессы напыления порошковых материалов. Докт. дис. техн. наук. ЛПИ им. М.И.Калинина.–Ленинград.–1985.–447 с.
4. О.П. Солоненко, А.Л. Сорокин. Межфазный обмен теплом в условиях радиально–кольцевой инъекции дисперсного материала в поток плазмы//Известия СО АН СССР, серия техн. наук. Вып. 5.Новосибирск: «Наука», сибирское отделение, 1990, 75–82.
5. Ермаков С.А., Карасёв М.В., Клубникин В.С., Масленников В.М., Соснин Н.А., Тополянский П.А., Фёдоров С.Ю. Способ плазменной обработки и плазмотрон//Патент WO 90/12123, 1990.

621.793

## КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХЗВУКОВОГО ПЛАЗМОТРОНА

Н.А. Руденская<sup>1</sup>, К.Й. Чой<sup>1</sup>, Н.В. Соколова<sup>2</sup>, А.В. Новоселов<sup>2</sup>,  
М.В.Руденская<sup>1</sup>, Н.Л.Кравченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Технопарк БНТУ «Политехник», НАН, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Техплазма», Дмитров, Россия

Материалы, в состав которых входят тугоплавкие компоненты, рационально напылять плазменным методом. Плазменные генераторы для нанесения покрытий выбирают исходя из состава, дисперсности исходных порошков и тех