

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

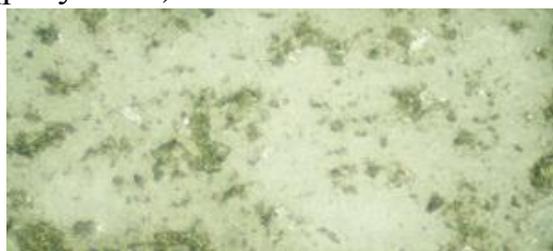
<sup>2</sup>ОАО «Техплазма», Дмитров, Россия

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

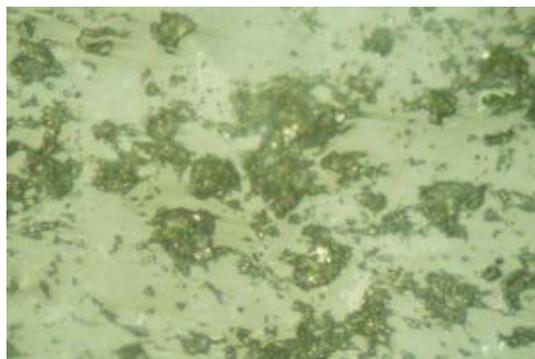
свойств, которые требуется придать покрытию. Широкие возможности плазмотронов позволяют успешно напылять различные виды микрокомпозитов. Так, с помощью сверхзвуковой плазмы реализовано напыление тугоплавких материалов с минимальным содержанием компонента связки и в чистом виде.

В качестве исходных материалов использовали керамические порошки: оксидные и боридные композиции. Порошки на основе боридов подвергали предварительной сфероидизации. Напыление покрытий проводили полидисперсными композициями. Эталонном служило покрытие из корунда. Порошки наносили на стальные образцы с помощью сверхзвукового плазмотрона. Материалом подслоя был выбран сплав Ni–Al.

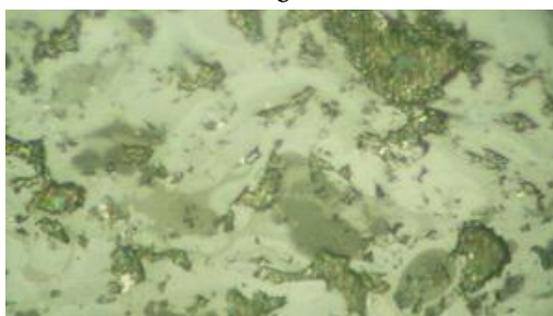
Рассмотрим особенности структурообразования покрытий двух типов: содержащих оксиды и бориды. Сравнительный анализ микроструктуры покрытий из оксидных микрокомпозитов, напыленных дозвуковым (покрытия Д) и сверхзвуковым (покрытия С) плазмотронами, свидетельствует о том, что покрытия, сформированные по технологии Д характеризуются слоистой структурой. Покрытия, полученные по технологии С, имеют структуру композита: в материале матрицы достаточно равномерно распределены включения неправильной формы, их количество и размер увеличиваются при переходе от  $Al_2O_3$  к оксидной керамике №1 и №2 (рисунок 1).



а



б



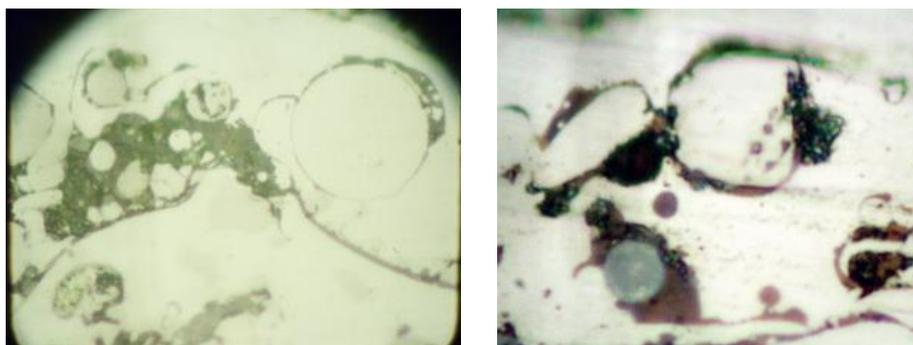
в

**Рисунок 1 – Микроструктура оксидно–керамических покрытий:**

а –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , б – керамика №1, в – керамика №2

Исходные порошки в виде микрокомпозитов на основе боридов хрома и титана сфероидизировали в потоке низкотемпературной плазмы. Исследования эффективности сфероидизации порошков показали, что композиции, содержащие диборид хрома, отличаются более высоким выходом сферического продукта в сравнении с порошками, в состав которых входит диборид титана. И это заметно отразилось на структуре напыленных слоев, которая состоит из деформированных частиц (имеющих вид слоев в напыленном покрытии) и исходных частиц (рисунок 2, а). В варианте составов с диборидом хрома исходные частицы в напыленном слое имеют сферическую форму. В структуре  $\text{TiB}_2$  – содержащих покрытий отмечено присутствие исходных частиц как сферической, так и неправильной формы (рисунок 2, б). Кроме того, в покрытиях с диборидом титана имеются

участки, соответствующие по составу  $\text{TiO}_2$ . Оксидные фазы распределены в основном вокруг боридных включений (рисунок 2, б), что свидетельствует о протекании окислительных процессов именно при формировании покрытия, так как сфероидизацию проводили в среде инертного газа.



а б

**Рисунок 2 – Микроструктура покрытий, содержащих бориды:**  
а – хрома, б – титана

Вторая часть исследований посвящена границе раздела покрытий со стальной подложкой. Здесь следует отметить, что все покрытия характеризуются высоким качеством этой зоны, отсутствуют даже одиночные поры (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Микроструктура границы раздела композиционных покрытий со стальной основой**

Необходимо отметить, что область материала подслоя является также композиционной, поскольку в ней присутствуют как слои, так и исходные частицы материала основного слоя покрытия, что позволяет утверждать о наличии перемешивания материалов основного слоя и подслоя в процессе формирования покрытия.

Таким образом, получены следующие положительные результаты при напылении тугоплавких порошков сверхзвуковым плазмотроном: сформирована плотная структура основного слоя различных составов покрытий (содержащих оксиды и бориды титана, хрома, алюминия, кремния, циркония); граница раздела сталь–напыленный слой характеризуется высоким качеством и композиционной структурой.

621.793

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМОТРОНА УШР–2 ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Н.А. Руденская<sup>1</sup>, С.А. Соболев<sup>2</sup>, М.В. Руденская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Технопарк БНТУ «Политехник», <sup>2</sup>Минский подшипниковый завод  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Для стандартных плазмотронов установок УПУ–3Д, УМП–8 по техническим характеристикам ограничена номенклатура порошков, применяемых для восстановления и упрочнения деталей, подверженных воздействию износа, коррозии, высоких температур, механических нагрузок.

В качестве образца новой техники, позволяющего расширить возможности используемых для напыления дисперсных материалов и по их химическому составу, и по размеру частиц, был выбран плазмотрон УШР–2 конструкции Сн–Петербургского института «Мортеплотехника».

Исходный порошок для напыления взят из группы материалов типа «оксидная керамика», способных к аморфизации, с целью более наглядного выявления структурных превращений в частицах под воздействием плазменного потока

Эксперимент проводили в две стадии следующим образом: на первой стадии в плазменном потоке обрабатывали частицы порошков как монодисперсных, так и полидисперсных с помощью двух плазмотронов (стандартного УМП–8 и УШР–2) с закалкой частиц в воду. При этом оценивали эффективность сфероидизации порошков, степень их аморфизации. Далее с использованием также двух плазменных генераторов формировали покрытия, определяя коэффициент использования порошков (КИП), и затем исследовали пористость и микроструктуру напыленных слоев.

Сравнительный анализ порошков и соответственно покрытий из них, обработанных в разных плазменных потоках, показал, что использование плазмотрона УШР–2 позволяет достичь следующих результатов:

– существенно повысить выход сферических частиц (для полидисперсного порошка от 58 до 89 %),

– увеличить количество аморфной фазы в микрокомпозите (для полидисперсного порошка от 28 до 47 %),