

алгоритмов в широком диапазоне тактовых частот. Пренебрежение данным требованием может привести к локальному резко изменяющемуся коэффициенту передачи, что в замкнутых системах (например, адаптивных) приводит к потере устойчивости системы в целом;

– микросхемы, разработанные по технологии PECL (ECL) и CMOS обладают наилучшими характеристиками, что предопределяет их использование для применения в наиболее ответственных узлах (например, ФАПЧ);

– получено математически обоснованное выражение, которое показывает, что величина сигнал/шум полученные по результатам цифровой обработки определяется не только количеством разрядов, участвовавших в вычислениях, но и существенно зависит от выбранной элементной базой вычислительной платформы и тактовой частоты.

## **ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИТЕЙНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

Шейнерт В. А., Слуцкий А. Г., Девойно О. Г., Долгий Л. П.

Белорусский национальный технический университет

slutski@bntu.by

**Аннотация.** Для нанесения защитных покрытий многофункционального назначения с использованием высокоэнергетических тепловых потоков (плазма, лазер) используются различные составы сложных интерметаллических порошковых материалов.

**摘要。** 为了使用高能热通量（等离子体、激光）施加多功能保护涂层，使用了各种复杂金属间化合物粉末材料的成分。

Важной технологической характеристикой порошков на стадии их подачи к газовой горелке или плазматрону является их текучесть. Они обуславливают стабильность подачи материалов, возможность точной регулировки расхода. Для обеспечения равномерной подачи порошка желательно использовать частицы сферической (или сфероидизированной) формы с незначительной пористостью и размером не менее 10 мкм [1]. Средний размер частиц порошков для газотермического напыления и широта диапазона используемой фракции являются одной из важнейших характеристик материала. Эти показатели зависят от состава напыляемого материала, используемого типа оборудования и заданных свойств покрытия.

Поскольку металлические порошки, предназначенные для газотермического напыления, в основном являются высоколегированными материалами, для которых очень важно обеспечение однородности частиц по составу, для их изготовления наиболее удобен метод распыления – диспергирование струи расплавленного металла или сплава с последующей кристаллизацией микрокапель.

Методами распыления можно получать порошки различных дисперсности и состава практически из всех металлов и сплавов. Для распыления

тугоплавких металлов (ниобия, молибдена, вольфрама) используют дуговые плазмотроны. Распыление осуществляют в воду или в защитную газовую среду (в последнем случае частицы порошка не окисляются). Распыленные металлы подвергают сушке, отжигу, рассеvu на нужные фракции.

Другим распространенным способом получения порошков для напыления является механическое измельчение (дробление, размол) компактных материалов. Этот способ применяют для хрупких металлов и сплавов. К ним могут быть отнесены материалы с высоким содержанием оксидов, силицидов, боридов, карбидов, например высоколегированные износостойкие чугуны [2].

В лабораторных условиях апробирован вариант получения компактных слитков, с использованием вакуумной индукционной плавки. В качестве объекта исследований были выбраны два типа сплавов – комплексный силицид, на основе никеля и титана и хромосилицид износостойкий чугун. Плавка шихты производилась в индукционной вакуумной печи с емкостью графитового тигля  $500\text{ см}^3$  методом скоростного сплавления при разрежении 1 Па, разливка осуществлялась в массивную графитовую форму с закалкой из жидкого состояния, что обеспечивало получение мелкодисперсной напряженной структуры. В дальнейшем слитки подвергались дроблению и размолу до требуемых фракций.

Предварительное дробление слитков до размеров частиц около  $5\oplus 10^{-3}\text{ м}$  производилось в ударной ступе и не вызывало трудностей, также сравнительно легко прошел размол до размера  $10\oplus 10^{-4}\text{ м}$  (100 мкм) в шаровой мельнице типа «пьяная бочка», однако для получения фракции  $40\text{--}60\oplus 10^{-5}\text{ м}$  (40–60 мкм), необходимой для напыления, пришлось применить центробежную мельницу.

В результате операций размола частицы порошков имели относительно равноосную, но осколочную, остроугольную форму, что не обеспечивало стабильную работу питателей-дозаторов установок напыления покрытий. Для увеличения технологической текучести полученных порошков применили окатывание их в барабане с корундовыми шарами в течение  $36\oplus 10^3\text{ с}$  (10 часов) с последующим пневматическим обеспыливанием.

На рисунке 1 приведены основные этапы процесса изготовления порошка из комплексного силицида.



Рисунок 1 – Этапы получения порошка из быстроохлажденных слитков  
а) вакуумная плавильная печь; б) – полученный слиток; в) после дробления;  
г) после размола

Такая методика [3] использовалась для получения всех испытанных материалов содержащих силициды и карбиды в матрицах твердых растворов.

В лаборатории Плазменных технологий Машиностроительного факультета БНТУ проведены испытания опытных образцов порошка комплексного силицида и хромосилицида чугуна при нанесении покрытий на алюминиевые и стальные заготовки (рисунок 2).

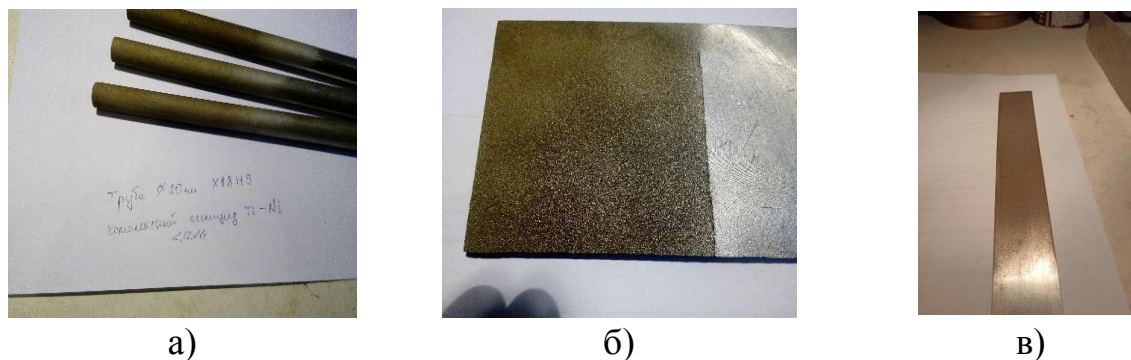


Рисунок 2 – Покрытие, нанесенное газопламенным напылением порошков на стальную трубу (а), алюминиевую пластину (б) и пластина с покрытием после прокатки (в)

Полученные покрытия на листовых заготовках выдерживали без отслаивания и растрескивания загиб на угол  $90^\circ$  с радиусом  $15 \pm 10^{-3}$  м и прокатку в валках диаметром  $10 \pm 10^{-2}$  м с обжатием 30 %.

Таким образом, в результате выполненных исследований:

– экспериментально опробован процесс изготовления закаленных слитков с использованием вакуумной индукционной плавки и разработаны технологические схемы получения порошков износостойких и жаростойких материалов для напыления с выходом на лабораторное производство;

– подобраны составы интерметаллических материалов для износостойких покрытий на основе хромосилицида чугуна и комплексных силицидов, содержащих никель и титан;

– в лабораторных условиях опробована технология получения слитков износостойких и жаростойких материалов в вакуумной индукционной печи.

– разработаны методики получения порошков на их основе дроблением и фракционированием литой термонапряженной заготовки;

– изготовлены опытные образцы порошков и получены предварительные результаты их испытаний при нанесении покрытий газопламенным напылением.

#### Список использованных источников

1. Борисов, Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1987. – 543 с.

2. Слуцкий, А. Г. Способы получения износостойких материалов для защитных покрытий с использованием литейно-металлургических методов /

А. Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов в 2 ч.* – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 216–225.

3. Хорольский, П. Д. Способы получения износостойких порошковых материалов для защитных покрытий с использованием плазмы и лазера / П. Д. Хорольский, И. Г. Раков, В. А. Шейнерт // *Новые материалы и технологии их обработки: материалы XXII Респ. студ. научн.-техн. конф., Минск, 21–22 апреля 2021 г.* / Белорус. нац. техн. ун-т: ред. кол.: И. А. Иванов [и др.]. – Минск, 2021. – С. 21–25.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОМ И ПОВЕРХНОСТНОЙ МОРФОЛОГИИ НА ПАРАМЕТРЫ СМАЧИВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО $Al_2O_3$**

Шиманович Д. Л.<sup>1</sup>, Тишкевич Д. И.<sup>2</sup>, Воробьева А. И.<sup>1</sup>, Труханов А. В.<sup>2</sup>

1 – Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

2 – Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению  
ShDL@tut.by

**Аннотация.** Изучено влияние технологических режимов электрохимического анодирования алюминия и химической модификации пор на структурно-морфологические параметры нанопористого  $Al_2O_3$  и на краевой угол смачивания алюмооксидных структур с целью увеличения гидрофильных свойств конечных модифицированных покрытий. Для синтеза различных видов  $Al_2O_3$ -структур с необходимыми функциональными параметрами осуществлялись методы двух- и трехстадийного анодирования при гальваностатических режимах. Показано, что путем регулирования электрохимических условий можно получать высокие гидрофильные параметры с краевым углом смачивания до  $17\text{--}20^\circ$  при использовании высоких значений плотности тока, времени анодирования и температуры электролита.

**摘要。** 为了提高最终改性涂层的亲水性，研究了铝的电化学阳极氧化和孔隙化学改性的技术制度对纳米多孔  $Al_2O_3$  的结构和形态参数以及氧化铝结构润湿角的影响。为了合成具有所需功能参数的不同类型的  $Al_2O_3$  结构，在恒电流模式下进行了两级和三级阳极氧化方法。结果表明，通过调整电化学条件，可以使用高电流密度、阳极氧化时间和电解液温度值获得润湿角高达  $17\text{--}20^\circ$  的高亲水参数。

Покрyтия с особой смачиваемостью, включая гидрофобные (супергидрофобные) и гидрофильные (супергидрофильные), в последние годы привлекают к себе значительный интерес в связи с их широким практическим применением – от самоочищающихся поверхностей до микрофлюидных и капельных технологий [1].

Электрохимическое анодирование – один из наиболее эффективных методов обработки поверхности и формирования наноструктурированной