

9. **ОАО «ВИАСМ»** [Электронный ресурс] / Новый способ нанесения защитных покрытий. Режим доступа: [http://www.viasm.ru/novyi\\_sposob.htm](http://www.viasm.ru/novyi_sposob.htm). Дата доступа: 13.03.16

10. **Способ нанесения** цинкового покрытия и технологическая линия для его осуществления: пат. РФ № 2117717, С23С10/36 / Л.Н. Кондрашов, К.Л. Арутюнянц; заявитель: Товарищество с ограниченной ответственностью «Синг»; заявл. 16.09.1997; опубл. 20.08.1998.

11. **Способ нанесения** цинкового покрытия путем термодиффузионного цинкования: пат. РФ № 2139366, С23С10/36 / Л.Н. Кондрашов, К.Л. Арутюнянц; заявитель: Товарищество с ограниченной ответственностью «Синг»; заявл. 22.12.1998; опубл. 10.10.1999.

12. **Способ нанесения** цинкового покрытия и установка для его осуществления: пат. РФ № 2174159, С23С10/36 / И.Л. Штыкан; заявитель: Штыкан Исаак Лейбович; заявл. 21.09.2000; опубл. 27.09.2001.

13. **Способ нанесения** цинкового покрытия и установка для его осуществления: пат. РФ № 2424351, С23С10/36 / В.И. Кубанцев, Д.С. Савицкий; заявитель: Кубанцев Виктор Иванович; заявл. 17.08.2009; опубл. 20.07.2011.

14. **Способ термодиффузионного** цинкования изделий из ферромагнитных материалов: пат. РФ № 2527593, С23С10/36 / М.Ф. Брунова, М.Л. Трачевский, В.И. Кубанцев; заявитель: Кубанцев Виктор Иванович; заявл. 19.02.2013; опубл. 10.09.2014.

*УДК 669.714*

**И.А. ИВАНОВ**, д-р техн. наук,  
**А.Г. СЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук,  
**В.А. ШЕЙНЕРТ**,  
**Э.В. КОВАЛЕВИЧ**,  
**И.Л. КУЛИНИЧ** (БНТУ)

## **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛИЦИДОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАТОДОВ-МИШЕНЕЙ**

Вакуумно-плазменная обработка изделий с формированием на их поверхности защитных слоев широко используется для придания

поверхности из этих материалов специальных свойств. В производстве широко применяются покрытия на основе соединений титана с кремнием и неметаллические мишени. Использование таких соединений обусловлено их свойствами (высокие температуры плавления, твердость, жаропрочность, износ- и коррозионная стойкость).

Процесс вакуумно-плазменного формирования покрытий на основе нитридов, карбидов или оксидов тугоплавких металлов из однокомпонентных металлических катодов достаточно прост в реализации и в настоящее время хорошо изучен. Качество таких покрытий определяется степенью химической чистоты катода-мишени, правильным выбором смеси технологических газов и величиной ускоряющего потенциала, подаваемого на подложку.

Для получения покрытий на основе таких соединений используют многокомпонентные мишени. Качество получаемых покрытий определяется степенью химической чистоты катода-мишени, правильным выбором смеси технологических газов и величиной ускоряющего потенциала, подаваемого на подложку.

Наиболее ранние из известных работ в этой области были направлены на разработку технологии получения катодов с максимально возможным содержанием в них кремния [1]. Анализ равновесных диаграмм состояний сплавов системы кремний – переходный металл IV и VI групп показал, что больше всего для решения этой задачи подходят сплавы с содержанием кремния более 66 ат. %. Покрытия, получаемые из таких катодов, обладают высокой твердостью, значительно повышают жаростойкость и коррозионную стойкость сталей и титановых сплавов, но не обладают эрозийной и противоударной стойкостью. Вместе с тем, анализ научной литературы показывает, что наибольшей твердостью в сочетании с высоким сопротивлением пластическим деформациям обладают покрытия Ti-Si-N с содержанием кремния около 8 ат. % [2]. Весьма эффективными для создания таких поверхностных слоев являются вакуумные ионно-плазменные технологии и, в частности, катодное распыление в разряде постоянного тока и в высокочастотном разряде. При катодном распылении в магнетронных распылительных системах высокая эффективность ионизации атомов и молекул рабочих газов и распыляемых мишеней увеличивает скорость

нанесения покрытий. Состав покрытий во многом определяется составом мишеней.

Традиционные способы получения многокомпонентных мишеней характеризуются рядом серьезных недостатков, таких как: высокая остаточная пористость мишеней, избыточное содержание примесей, необходимость использования в ряде случаев дорогого и сложного оборудования. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения.

Технология СВС позволяет обеспечить высокую плотность, химическую и структурную однородность продуктов синтеза, низкое содержание примесей благодаря явлению самоочистки в волне горения, достижение требуемых механических, тепло- и электрофизических свойств, необходимых для материала мишени. При этом существенно снижаются материальные и энергетические затраты.

Перспективным представляется метод металлотермического восстановления компонентов. В металлотермии в качестве восстановителей обычно используют следующие элементы: алюминий, кальций, магний и кремний. Основное значение металлотермии состоит в получении безуглеродистых металлов и сплавов, необходимых в ряде производств. Реакции восстановления алюминием и магнием сопровождаются выделением значительного количества теплоты. При использовании кремния этой теплоты обычно недостаточно для внепечного осуществления процесса, и плавку ведут с подогревом смеси. Ранее выполненные термодинамические расчеты показали, что применение алюминия в качестве восстановителя позволяет осуществлять процесс в большинстве случаев без внешнего подогрева [3].

В лабораторных условиях проведены предварительные эксперименты высокотемпературного синтеза силицидов. Для этого выполнены расчеты термичности исходных смесей, подобраны их составы для восстановительной плавки, результаты которых представлены в работе [3]. На основе проведенных экспериментов подтверждена реальная возможность получения силицидов системы никель-кремний-титан.

В таблице 1 представлены результаты восстановительных плавков силицидов данной системы.

Таблица 1 – Составы восстановительных смесей и результаты плавки силицидов

№ смеси	Состав восстановительной смеси, %					Восстановитель Al, г	Температура подогрева, °С	Металлургический выход, %
	NiO	CuO	СК15	СК30	TiO <sub>2</sub>			
1	43	–	14	–	43	18	600	92
2	43	–	–	14	43	15	600	92

В качестве основных компонентов смесей использовались порошки оксида никеля и титана, измельченная лигатура силикокальция, содержащая различное количество кальция. При этом основным восстановителем был порошок алюминия. Использование силикокальция в составе смеси позволяло получить в силициде необходимое количество кремния в готовом виде. Кальций данной лигатуры, как эффективный восстановитель, позволял интенсифицировать процесс восстановления титана и никеля. Результаты экспериментов подтвердили это обстоятельство.

Процесс восстановительной плавки протекал активно и стабильно, что отразилось на металлургическом выходе по слитку полученного силицида (рисунок 1).



Рисунок 1 – Образец силицида титан-кремний-никель

Исследование элементного состава опытного образца силицида системы титан-кремний-никель проводилось с помощью микро-рентгеноспектрального анализатора «INCA 350» фирмы «OxfordInstruments» (Англия), результаты которого представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Элементный состав опытного образца силицида системы титан-кремний-никель

Элемент	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Ti	Fe	Ni	Итого
%	13,33	3,14	0,2	22,85	12,78	0,07	0,17	0,31	18,03	1,95	27,18	100

Установлено, что полученный силицид содержит 27 % никеля, 18 % титана, 13 % кремния, 13 % углерода и значительное количество остаточного алюминия. Наличие в полученном силициде углерода, по-видимому, связано с используемой технологической оснасткой (графит-шамотный тигель).

Использование в составе смеси кальция в виде лигатуры с кремнием позволило заменить часть алюминия в восстановительной плавке. Данное обстоятельство подтверждается результатами химического анализа шлака, полученного от восстановительной плавки (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты химического анализа образца шлака при получении силицида титан-никель-кремний

Элемент	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Ti	Итого
%	11,52	41,24	0,29	0,08	27,02	0,26	0,10	0,23	8,97	10,30	100

Кальция в шлаковой фазе содержится порядка 9 %, а в слитке силицида его практически нет. Это свидетельствует о его полном расходовании на восстановление никеля и титана. Следует отметить отсутствие в шлаке кремния, что свидетельствует о его полном усвоении из смеси. В шлаковой части обнаружено ~ 10 % титана, что свидетельствует о его неполном восстановлении из оксидной фазы в процессе плавки. Что касается никеля, то в шлаке его не обнаружено. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по составу силицида свидетельствует, что никель и кремний перешли в сплав практически полностью, а титан восстановился на 50 %. Алюминий как основной восстановитель в процессе плавки был задействован не полностью. Шлаковая фаза содержит также ~ 11 % углерода.

Дальнейшие исследования процесса получения силицидов будут направлены на оптимизацию количества вводимого в состав смеси основного восстановителя, а также использования технологической оснастки, позволяющей минимизировать поступление в слиток углерода.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований подтверждена реальная возможность получения силицидов никель-кремний-титан.

## Литература

**1. Иванов, И.А.** Термодинамический анализ восстановительных процессов силицидных систем / И.А. Иванов, А.Г. Слуцкий, Э.В. Ковалевич // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-ой Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2016. – С. 7–8.

**2. Ковалевич, Э.В.** Исходные компоненты для изготовления катодов-мишеней из сплавов металл-кремний металлотермическим восстановлением / Э.В. Ковалевич, И.А. Иванов, А.Г. Слуцкий // Новые материалы и технологии их обработки: материалы XVII Респ. студ. научн.-техн. конф., Минск, 20–22 апреля 2016 г./ Белорус. нац. техн. ун-т: ред. кол.: И.А. Иванов [и др.]. – Минск, 2016. – С. 17–19.

**3. Исследование** процесса получения сплавов металл-кремний для изготовления катодов-мишеней / И.А. Иванов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск 14–16 сент. 2016 г. / ФТИ НАН Беларуси.– Минск, 2016. – С. 32–34.

УДК 621.785.5

**М.В. СИТКЕВИЧ**, д-р техн. наук,  
**А.В. ИЛЬЕНЯ** (БНТУ)

## **ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОРОШКОВОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕГОСЯ В УСЛОВИЯХ ЗАВОДА ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ»**

С целью повышения долговечности инструментальной оснастки в условиях термического цеха инструментального производства ОАО «Гомсельмаш» проведены работы по применению процессов