

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИТЕЙНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

А.Г.СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, **Н.В. ЗЫК**, канд. хим. наук,
В.А. ШЕЙНЕРТ, **И.А. КАСПЕРОВИЧ**, **Е.А. МАЛЫШКО**
Белорусский национальный технический университет

На основании анализа способов получения материалов для защитных покрытий, наносимых высокоэнергетическими плазменными и лазерными потоками, предложены литейные технологические схемы, на основании которых будут созданы лабораторные установки для изготовления порошков из комплексных сплавов. В лабораторных условиях апробирован вариант получения компактного слитка сплава на основе хрома, никеля и кремния высокоскоростной индукционной плавкой. Проведены термодинамические расчеты, подобраны составы восстановительных смесей на основе оксидов хрома и никеля, силикокальция и алюминия и в лабораторных условиях получены опытные слитки аналогичного сплава металлургическим способом.

Ключевые слова: порошки для защитных покрытий, способы получения, распыление жидкого расплава, центробежно-дуговой метод, размельчение и размол слитков.

METHODS FOR PRODUCING WEAR-RESISTANT MATERIALS FOR PROTECTIVE COATINGS USING CASTING METALLURGICAL METHODS

A.G. SLUTSKY, Ph. D in Technical Sciences, **N.V. ZYK**, Ph. D in Chemistry,
V.A. SHEYNERT, **I.A. KASPEROVICH**, **E.A. MALYSHKO**
Belarusian National Technical University

Based on the analysis of methods for obtaining materials for protective coatings applied by high-energy plasma and laser flows, foundry technological schemes have been proposed on the basis of which laboratory installations for the production of powders from complex alloys will be created. In laboratory conditions, a variant of obtaining a compact ingot of an alloy based on chromium, nickel and silicon by high-speed induction melting has been tested. Ther-

modynamic calculations were carried out, the compositions of reducing mixtures based on oxides of chromium and nickel, silicocalcium and aluminum were selected, and experimental ingots of a similar alloy were obtained under laboratory conditions by the metallothermic method.

Keywords: *powders for protective coatings, production methods, spraying of liquid melt, centrifugal arc method, crushing and grinding of ingots.*

Для нанесения защитных покрытий многофункционального назначения с использованием высокоэнергетических тепловых потоков (плазма, лазер) используются различные составы сложных интерметаллических износостойких материалов, содержащих в том числе тугоплавкие металлы. Например, силициды тугоплавких и переходных металлов, сплавы с высоким содержанием свободных карбидов, интерметаллические соединения с особыми свойствами и другими металлами обладают высокой температурой плавления, твердостью, жаропрочностью, износо- и коррозионной стойкостью. Для получения покрытий на основе таких соединений используют многокомпонентные порошковые смеси, поставляемые в Беларусь по импорту. При этом качество получаемых покрытий определяется степенью химической чистоты используемых материалов.

Практический опыт применения газотермических покрытий, накопленный за последние 20–30 лет в различных отраслях промышленности, показывает, что таким путем можно, как правило, в 2–5 раз уменьшить износ деталей машин, эксплуатируемых в самых разных условиях, а также эффективно восстанавливать изношенные детали [1].

Для получения покрытий методами газотермического напыления в настоящее время используют в основном порошок, проволоку, стержень, гибкий шнур. Все большее распространение в последнее время получают композиционные порошки, такие как Ni-Cr-Al; Ni-Ti; Ti-SiC; Ti-B₄C; Ni-Cr₃C₂; Ni-Cr-B-Si; Ni-Cr-Si.

Важной суммирующей характеристикой порошков на стадии их подачи к газовой горелке или плазматрону является их текучесть, что обуславливает 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 [2].

Основными способами изготовления порошков для газотермического получения покрытий являются следующие: распыление расплава; распыление проволоки плазменной струей; механическое измельчение слитка; металлотермическое восстановление оксидов; самораспространяющийся высокотемпературный синтез (метод СВС).

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.

Распыление может осуществляться струей жидкости (например, водой под большим напором), газа (нейтрального газа высокого давления или сжатого воздуха), а также механическими средствами (центробежное, ультразвуковое распыление и др.).

На рисунке 1 приведена схема получения закаленных порошков.

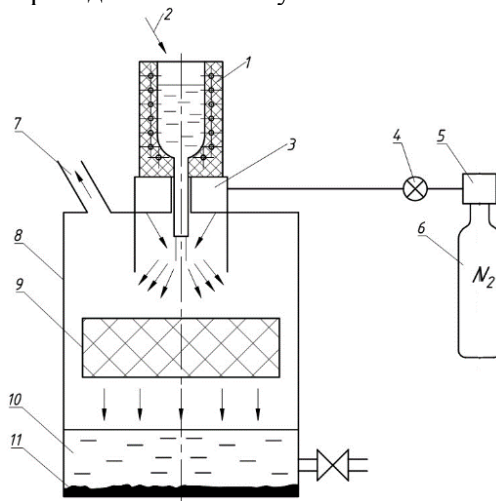


Рисунок 1 – Схема установки для получения закаленных металлических порошков:

- 1 – электрообогреваемый металлоприемник-дозатор; 2 – исходный расплав;
- 3 – распыляющая форсунка; 4 – электроклапан; 5 – регулятор давления; 6 – баллон со сжатым азотом; 7 – выхлопные газы в вентиляцию; 8 – корпус установки;
- 9 – насадка вторичного дробления капель расплава; 10 – водяной бассейн;
- 11 – полученный порошок

Исходный расплав (2) заливают в обогреваемый металлоприемник (1), через который осуществляется дозированная его подача через форсунку (3), где за счет струи азота (6) происходит первичное распыление сплава с последующим вторичным дроблением за счет специальной насадки (9). Полученный порошок попадает в водной бассейн (10).

Согласно схеме, изображенной на рисунке 2, порошок из комплексного сплава получается центробежно-дуговым способом. Вначале отливается специальная заготовка (1) из требуемого сплава, которая в дальнейшем крепится к регулируемому вращающемуся приводу (2). Над заготовкой устанавливается графитовый электрод (6), на который подается ток (5). Для обеспечения равномерности горения дуги подача электрода осуществляется через специальный привод (7). Для обеспечения равномерности горения дуги подача электрода осуществляется через специальный привод (7).

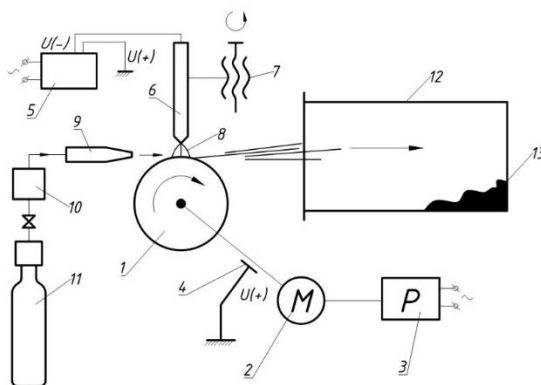


Рисунок 2 – Схема установки для получения порошка центробежно-дуговым способом:

- 1 – вращающаяся заготовка из исходного сплава; 2 – электропривод вращения заготовки; 3 – полупроводниковый регулятор частоты вращения заготовки;
- 4 – скользящий электрический токопровод к заготовке; 5 – источник тока дуги;
- 6 – графитовый электрод; 7 – привод подачи электрода; 8 – электрическая дуга;
- 9 – газовое сопло; 10 – регулятор давления газа; 11 – баллон с инертным газом (азот, аргон); 12 – бункер для сбора порошка; 13 – готовый порошок

В процессе горения дуги между вращающимся диском-сплавом и графитовым электродом металл распыляется потоком инертного газа, подаваемого по давлению через сопло (9) и полученный поро-

шок поступает в бункер (12). Распыленные металлы подвергают сушке, рассеву и выделению нужной фракции.

Такими способами распыления можно получать порошки практически всех металлов и сплавов различных дисперсности и состава. По данным схемам планируется в дальнейшем изготовление лабораторных установок.

Другим распространенным способом получения порошков для напыления является механическое измельчение (дробление) компактных материалов. Этот способ применим для хрупких металлов и сплавов, природных минералов, отходов металлургической и металлообрабатывающей промышленности.

Исходя из вышеприведенного анализа в сфере производства порошков для напыления, наиболее приемлемым способом их изготовления с точки зрения технологической простоты и минимизации затрат является прямая плавка (металлургический синтез) исходных материалов с получением компактного слитка с последующим измельчением его до необходимых фракций. Ранее выполненные исследования [3, 4] показали эффективность получения компактных слитков комплексных силицидов методом высокоскоростной индукционной плавки. По данной методике была проведена опытная плавка и получен слиток сплава на основе хрома никеля и кремния. На рисунке 3 приведены основные этапы процесса изготовления порошка из комплексного сплава на основе хром-никеля и кремния.

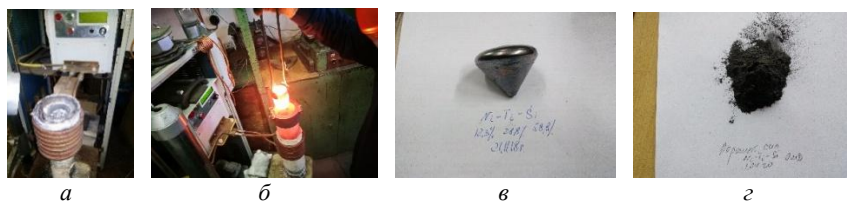


Рисунок 3 – Этапы получения композиционного порошка из слитка сплава Ni-Cr-Si:

а – высокоскоростная плавильная установка; *б* – извлечение тигля с расплавом; *в* – полученный слиток; *г* – порошок после дробления и размола

По такой методике в дальнейшем будут отработаны технологические режимы плавки и изготовлены опытные образцы слитков износостойких сплавов, легко поддающихся измельчению и размолу до требуемой фракции.

Перспективным является метод получения компактных слитков аналогичных износостойких сплавов металлотермическим восстановлением легирующих элементов из оксидной фазы. Ниже представлены результаты термодинамических расчетов такого процесса (таблица 1). В качестве восстановителей использовали алюминий, кремний, кальций.

Таблица 1 – Результаты термодинамических расчетов реакций металлотермического восстановления молибдена, никеля и хрома

№ смеси	Реакция восстановления	ΔH , Дж/моль	Термичность q , Дж/г
1	$2\text{NiO} + 4/3\text{Al} = 2\text{Ni} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$	-638 067	3442
2	$\text{NiO} + \text{Ca} = \text{Ni} + \text{CaO}$	-395 510	3469
3	$\text{NiO} + 1/2\text{Si} = \text{Ni} + 1/2\text{SiO}_2$	-215 875	2434
4	$1/3\text{MoO}_3 + 2/3\text{Al} = 1/3\text{Mo} + 1/3\text{Al}_2\text{O}_3$	-310 267	4701
5	$1/3\text{MoO}_3 + \text{Ca} = 1/3\text{Mo} + \text{CaO}$	-386 843	4395
6	$2/3\text{MoO}_3 + \text{Si} = 2/3\text{Mo} + \text{SiO}_2$	-414 217	3341
7	$2/3\text{Cr}_2\text{O}_3 + 4/3\text{Al} = 4/3\text{Cr} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$	-365 333	2661
8	$1/3\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Ca} = 2/3\text{Cr} + \text{CaO}$	-255 510	4036
9	$2/3\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Si} = 4/3\text{Cr} + \text{SiO}_2$	-45 000	348

Анализ полученных данных показывает, что никель, молибден и хром в принципе можно восстанавливать алюминием, кальцием и кремнием. Важной характеристикой такого процесса является показатель термичности смеси оксида металла и восстановителя. Если этот показатель ниже значения 2300 Дж/г, то для успешного протекания процесса восстановления необходим подогрев смеси [5].

Высокую термичность имеют смеси на основе оксидов никеля, молибдена и хрома, где в качестве восстановителя используется алюминий и особенно кальций (рисунок 4).

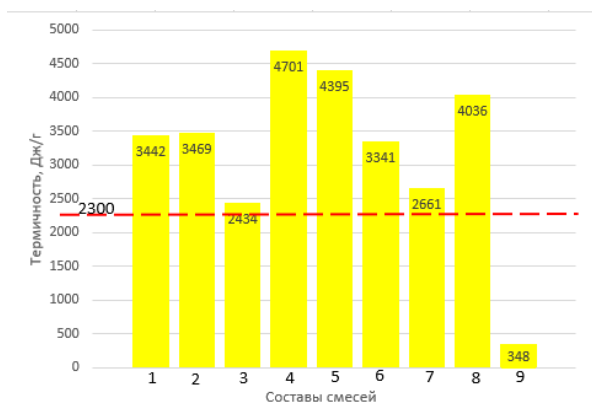


Рисунок 4 – Влияние состава восстановительной смеси на терминность

С учетом полученных расчетных данных был подобран состав смеси и проведена восстановительная плавка по методике, описанной в работе [6]. На рисунке 5 представлены фотографии основных этапов процесса получения порошка из слитка сплава Ni-Cr-Si данным способом.



Рисунок 5 – Основные этапы получения слитка сплава Ni-Cr-Si металлотермическим восстановлением с последующим измельчением:
а – металлотермическая восстановительная плавка; *б* – полученный слиток;
в – сплав после измельчения

Таким образом, в результате выполненных исследований разработаны схемы получения износостойких порошков для напыления, на основе которых будут изготовлены лабораторные установки, а также экспериментально апробирован процесс изготовления порошка из слитка сплава никель-хром-кремний, полученного высокоскоростной индукционной плавкой.

Список литературы

1. **Газотермические** покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1987. – 543 с.
2. **Самсонов, Г.В.** Силициды / Г.В. Самсонов, Л.А. Дворнина, В.М. Рудь. – М: Metallurgiya, 1979. – 272 с.
3. **Изготовление** катодов-мишеней из композиционных силицидов для нанесения защитных покрытий с применением литейно-деформационной технологии / И.А. Иванов [и др.]. – Литье и металлургия. – 2021 – № 2. – С. 68–75.
4. **Совершенствование** процесса получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников / И.А. Иванов [и др.] // Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр.: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2020. – Вып. 41, ч. 2. – С. 1–14.
5. **Энерго-** и ресурсосберегающие процессы получения лигатур на основе молибдена, хрома и марганца / А.Г. Слуцкий [и др.] // Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып. 39. – С. 102–106.
6. **Слуцкий, А.Г.** Энергосберегающая технология получения лигатур на основе молибдена / А.Г. Слуцкий, А.С. Калиниченко, В.А. Шейнерт // Литье и металлургия. – 2014. – № 2. – С. 91–94.

References

1. **Gazotermicheskie** pokrytiya iz poroshkovyh materialov [Thermal gas coatings from powder materials] / YU.S. Borisov [et al.]. – Kiev: Naukova dumka Publ., 1987. – 543 p.
2. **Samsonov, G.V.** Silicidy [Silicides] / G.V. Samsonov, L.A. Dvornina, V.M. Rud'. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. – 272 p.
3. **Izgotovlenie** katodov-mishenej iz kompozicionnyh silicidov dlya naneseniya zashchitnyh pokrytij s primeneniem litejno-deformacionnoj tekhnologii [Production of target cathodes from composite silicides for applying protective coatings using casting-deformation technology] / I.A. Ivanov [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2021. – No. 2. – P. 68–75.
4. **Sovershenstvovanie** processa polucheniya katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlya vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov [Improvement of the process of obtaining target cathodes from complex

silicides for vacuum ion-plasma sources / I.A. Ivanov [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhdovedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2020. – Vyp. 41, Part 2. – P. 1–14.

5. Energo- i resursosberegayushchie processy polucheniya ligatur na osnove molibdena, hroma i marganca [Energy- and resource-saving processes for obtaining ligatures based on molybdenum, chromium and manganese] / A.G. Slutsky [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhdovedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2018. – Vyp. 39. – P. 102–106.

6. Slutsky, A.G. Energoberegayushchaya tekhnologiya polucheniya ligatur na osnove molibdena [Energy-saving technology for obtaining ligatures based on molybdenum] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy.* – 2014. – No. 2. – P. 91–94.

Поступила 04.10.2021
Received 04.10.2021