

УДК 669.714, 621.718

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
КАТОДОВ-МИШЕНЕЙ ИЗ КОМПЛЕКСНЫХ СИЛИЦИДОВ
ДЛЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

И.А. ИВАНОВ, д-р техн. наук, **А.Г. СЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук,
В.А. ШЕЙНЕРТ, **А.Н. БЕЛЫЙ**, **А.П. БЕЖОК**, канд. техн. наук,
Ю.А. КОСТЮЧЕНКО, **Э.В. КОВАЛЕВИЧ**
Белорусский национальный технический университет

В статье представлены результаты экспериментальных исследований усовершенствованного процесса изготовления катодов-мишеней из комплексного силицида для нанесения защитных покрытий вакуумным ионно-плазменным методом. В основе технологии использован совмещенный литейно-деформационный способ, включающий получение слитка комплексного силицида никель-титан-кремний с использованием высокоскоростной индукционной плавки, последующего его размола в порошок до требуемой фракции и получение готового изделия с использованием метода прессования. В лабораторных условиях отработаны режимы плавки комплексных силицидов, их размола и последующего прессования. Изготовлены опытные образцы катодов-мишеней и проведена их термическая обработка.

Ключевые слова: катоды-мишени, комплексный силицид, защитные покрытия, ионно-плазменный метод.

**IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF OBTAINING
TARGET CATHODES FROM COMPLEX SILICIDES
FOR VACUUM ION-PLASMA SOURCES**

I.A. IVANOU, Dr. of Engineering Sciences, **A.G. SLUTSKY**, Ph.D in Technical Science, **V.A. SHEINERT**, **A.N. BELY**, **A.P. BEZHOK**, Ph.D in Technical Science, **Yu.A. KASTSIUCHENKA**, **E.V. KOVALEVICH**
Belarusian National Technical University

The article presents the results of experimental studies of an improved process for the manufacture of target cathodes from complex silicide for the appli-

cation of protective coatings by the vacuum ion-plasma method. The technology is based on a combined casting-deformation method, including obtaining an ingot of complex nickel-titanium-silicon silicide using high-speed induction melting, then grinding it into powder to the required fraction and obtaining a finished product using the pressing method. In laboratory conditions, the modes of melting complex silicides, their grinding and subsequent pressing have been worked out. Prototypes of target cathodes were made and heat treated.

Keywords: *target cathodes, complex silicide, protective coatings, ion-plasma method.*

Ранее выполненные исследования [1–4] показали возможность изготовления катодов мишеней различными способами. Экспериментально апробирован процесс высокотемпературной восстановительной плавки комплексных силицидов на основе оксидов титана, никеля, меди и кремния, а также высокоскоростная индукционная плавка аналогичных силицидов с использованием металлических компонентов с последующей заливкой полученного расплава в специальные литейные формы, позволяющей получать отливку катода мишени вместе с тоководом (рисунок 1).



Рисунок 1 – Отливка (а) полученная в разовой литейной форме и готовый катод-мишень с тоководом (б) [2]

Предварительные испытания опытных образцов полученных катодов мишеней при нанесении вакуумных ионно-плазменных защитных покрытий показали их работоспособность. Вместе с тем, были выявлены и некоторые недостатки, в частности невысокая плотность и однородность материала, полученного методом литья. Кроме того, в процессе кристаллизации и последующего охлажде-

ния отливки силицида в месте контакта его с стальным тоководом возникали напряжения, приводящие к появлению в катоде мишени трещин, что недопустимо.

В настоящей работе обобщены результаты экспериментальных исследований процесса изготовления таких катодов-мишеней с использованием совмещенной литейно-деформационной технологии, суть которой заключается в получении отливки из силицида с последующим размолом материала, прессованием и спеканием заготовки.

Плавка комплексного силицида осуществлялась на высокоскоростной индукционной установке по методике, описанной в работе [3]. В качестве шихтовых материалов использовали кристаллический кремний, электролитический никель и кусковой титан. Процесс вели по специально отработанной методике, позволяющей минимизировать угар основных элементов силицида. Полученный расплав силицида разливали в открытые литейные формы, конструкция которых обеспечивала его направленную кристаллизацию. В лабораторных условиях была проведена серия плавов комплексного силицида и получены слитки общим весом 1,73 кг следующего химического состава: кремний – 19,94 %, никель – 29,56 %, титан – 50,48 %.

В дальнейшем полученные слитки силицида подвергались дроблению и последующему размолу в лабораторной мельнице с использованием стальных шаров (диаметром 8 и 35 мм), что обеспечило получение мелкой фракции размером менее 0,08 мм. При этом продолжительность размолу навески 500 г составляла порядка 60 мин. Основные этапы процесса приведены на рисунке 2.

На следующем этапе проведены экспериментальные исследования процесса прессования порошка комплексного силицида. Для этого была изготовлена технологическая оснастка, общий вид которой приведен на рисунке 3.

Экспериментально было подобрано усилие прессования порошка силицида, которое составило порядка $7-10 \text{ т/см}^2$, что обеспечило начальную технологическую прочность. По такому режиму были изготовлены брикеты, общий вид которых представлен на рисунке 1, б. В дальнейшем брикеты силицида прошли термическую обработку в виде отжига и спекания по различным режимам (нагрев до температур 200, 400, 600 и 800 °С, выдержка в течение 2 ч и охлаждение с

печью. Для оценки влияния термообработки на прочность брикетов на лабораторном прессе Р-5 с использованием стального шара диаметром 25,4 мм были проведены испытания на их прочность. Установлено, что максимальную прочность (усилие 0,4 т) имел брикет силицида, обработанный при температуре 800 °С. Термическая обработка при более низких температурах (до 400 °С) не оказала существенного влияния на прочность брикета.



а – металлическая шихта (кремний, никель, титан);
б – высокоскоростная индукционная плавка; *в* – полученный слиток;
г – после охлаждения; *д* – после дробления; *е* – после размола

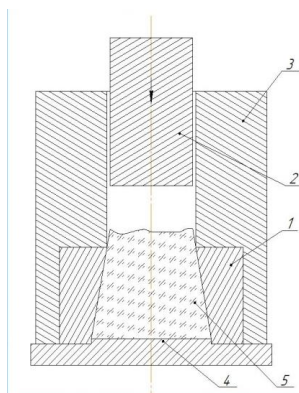
Рисунок 2 – Основные этапы получения порошка комплексного силицида



а
б

Рисунок 3 – Технологическая оснастка для отработки режимов деформации порошка комплексного силицида (*а*) и опытный образец полученного брикета (*б*)

Известно, что катоды-мишени, используемые для нанесения защитных покрытий, являются съемными и водоохлаждаемыми, и состоят обычно из двух частей: рабочей части, которая испаряется дугой, и токовода, обеспечивающего крепление катода в испарителе и его быструю замену, а также эффективный электрический контакт с его испаряемой частью. С учетом результатов ранее выполненных исследований [4] был предложен способ изготовления катода-мишени методом прессования дисперсного порошка комплексного силицида, с последующей припайкой к нему токовода (рисунок 4).



1 – матрица; *2* – пуансон; *3* – корпус прессформы;
4 – пята прессформы; *5* – порошок силицида

Рисунок 4 – Схема прессования катода-мишени из порошка комплексного силицида

Матрица (*1*), изготовленная из инструментальной стали, имеет форму катода-мишени, который используется при нанесении покрытий с использованием вакуумных ионно-плазменных источников. Корпус прессформы (*3*) позволяет центрировать пуансон (*2*) в процессе прессования порошка силицида (*5*). Для предотвращения попадания порошка между матрицей (*1*) и пятой прессформы (*4*) предусмотрен специальный выступ.

Были проведены расчеты усилия прессования, которые позволили определить необходимую навеску порошка комплексного силицида при получении готового катода. Расчетная навеска порошка комплексного силицида фракцией менее 0,08 мм загрузжалась вме-

сте с пластификатором в матрицу и подвергалась прессованию с усилием не менее 50 т. Полученная заготовка катода-мишени извлекалась из матрицы и подвергалась термической обработке по специальному режиму.

В дальнейшем нижняя поверхность катода-мишени полировалась и к ней припаивался стальной токовод. На рисунке 5 представлены фотографии полученного катода-мишени и его элементов.



а – прессованная заготовка катода-мишени и стальной токовод;
б – готовый катод-мишень

Рисунок 5 – Основные этапы изготовления катода мишени литейно-деформационным методом

Таким образом, в результате экспериментальных исследований разработан литейно-деформационный метод изготовления катодов мишеней для вакуумных ионно-плазменных источников.

Однако, несмотря на обнадеживающие результаты использования разработанной методики, в структуре прессованных заготовок катода обнаружена микропористость. При этом плотность прессовок составляла 80–85 % от фактической плотности литой заготовки. По-видимому, это связано в первую очередь, несмотря на высокое удельное давление прессования, с несжимаемостью частиц силицида при полном отсутствии пластических свойств. Поэтому, даже наращивание усилий прессования не обеспечит снижение пористости такого катода. Одним из вариантов решения данной задачи является применение специально подобранного фракционного состава порошка силицида для прессования, обеспечивающего наиболее плотную упаковку частиц полученной заготовки.

В связи с вышеизложенным был проведен анализ плотнейших упаковок сферических частиц и с помощью 3D моделирования гексагональной плотной упаковки определен размер и количество частиц для заполнения пустот вплоть до четвертого порядка с доста-

точным уровнем приближения, учитывающим коэффициент несферичности реальных частиц (0,6–0,8).

С учетом полученных результатов и применительно к конкретной вакуумно-электродуговой испарительной установке в дальнейшем планируется порошок такого фракционного состава применять для получения прессованных заготовок катодов-мишеней с фактической плотностью 90–95 %.

Список литературы

1. Технологические особенности получения силицидов на основе меди, никеля и титана для катодов-мишеней / И.А. Иванов [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2017. – Вып. 38. – С. 84–90.

2. Получение катодов-мишеней из силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников / И.А. Иванов [и др.] // *Литье и металлургия.* – 2018. – № 2 (91). – С. 99–102.

3. Технологические варианты получения катодов-мишеней из силицидов металлов для вакуумных ионно-плазменных источников / И.А. Иванов [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2018. – Вып. 39. – С. 107–111.

4. Особенности получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников литейно-деформационным методом / И.А. Иванов [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 40. – С. 90–95.

References

1. *Tekhnologicheskie osobennosti polucheniya silicidov na osnove medi, nikelya i titana dlya katodov-mishenej* [Technological features of obtaining silicides based on copper, nickel and titanium for target cathodes] / I.A. Ivanou [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2017. – Vyp. 38. – P. 84–90.

2. *Poluchenie katodov-mishenej iz silicidov dlya vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov* [Obtaining target cathodes from silicides for

vacuum ion-plasma sources] / I.A. Ivanou [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2018. – No. 2(91). – P. 99–102.

3. Tekhnologicheskie varianty polucheniya katodov-mishenej iz silicidov metallov dlya vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov [Technological options for producing target cathodes from metal silicides for vacuum ion-plasma sources] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhdomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ., 2018. – Vyp. 39. – P. 107–111.

4. Osobennosti polucheniya katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlya vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov litejno-deformacionnym metodom [Features of obtaining target cathodes from complex silicides for vacuum ion-plasma sources by the casting-deformation method] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhdomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ., 2019. – Vyp. 40. – P. 90–95.

Поступила 27.08.2020

Received 27.08.2020