



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-83-90>
УДК 669.714, 621.718

Поступила 05.07.2022
Received 05.07.2022

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПОЛУЧЕНИЯ КАТОДОВ-МИШЕНЕЙ ИЗ СИЛИЦИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

И. А. ИВАНОВ, А. Г. СЛУЦКИЙ, В. А. ШЕЙНЕРТ, А. Н. БЕЛЫЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: deanmtf@bntu.by

В статье обсуждаются технологические принципы совершенствования процесса изготовления расходоуемых катодов-мишеней вакуумных электродуговых испарительных установок из комплексных силицидов, в основу которых положены подбор химического состава, согласно анализу диаграмм состояния двойных и тройных систем, получение быстроохлажденных слитков с использованием высокоскоростной индукционной плавки, последующее измельчение и размол до порошка требуемой фракции, статическое либо динамическое прессование заготовки катода, ее спекание и припайка токовода. Представлены результаты лабораторных исследований процесса и получены опытные образцы изделий.

Ключевые слова. Комплексные силициды, состав, индукционная плавка, высокоскоростная кристаллизация слитка, дробление и размол в порошок, статическое и динамическое прессование заготовки, спекание, образец катода-мишени.

Для цитирования. Иванов, И. А. Комплексный подход к решению технологической задачи получения катодов-мишеней из силицидов переходных металлов для вакуумных ионно-плазменных источников / И. А. Иванов, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, А. Н. Белый // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 83–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-83-90>.

AN INTEGRATED APPROACH TO SOLVING THE TECHNOLOGICAL PROBLEM OF OBTAINING TARGET CATHODES FROM TRANSITION METAL SILICIDES FOR VACUUM ION-PLASMA SOURCES

I. A. IVANOV, A. G. SLUTSKY, V. A. SHEYNERT, A. N. BELY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: deanmtf@bntu.by

The article discusses the technological principles of improving the manufacturing process of consumable cathodes-targets of vacuum electric arc evaporation plants from complex silicides. Which are based on: the selection of chemical composition based on the analysis of state diagrams of double and triple systems, the production of fast-cooled ingots using high-speed induction melting, subsequent grinding and grinding to a powder of the required fraction, static or dynamic pressing of the cathode blank, its sintering and soldering of the current guide. The results of laboratory studies of the process are presented and prototypes of products are obtained.

Keywords. Complex silicides, composition, induction melting, high-speed crystallization of the ingot, crushing and grinding into powder, static and dynamic pressing of the workpiece, sintering, a sample of the target cathode.

For citation. Ivanov I. A., Slutsky A. G., Sheynert V. A., Bely A. N. An integrated approach to solving the technological problem of obtaining target cathodes from transition metal silicides for vacuum ion-plasma sources. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 83–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-83-90>.

Введение

При производстве изделий медицинского назначения и инструмента широко используются защитные покрытия различного назначения со специальными свойствами. В качестве покрытия применяются разные по составу материалы, в том числе содержащие ряд тугоплавких металлов. Например, покрытия нитридом титана другими интерметаллидами, обладающие высокой твердостью, жаропрочностью, износо- и коррозионной стойкостью. Для нанесения покрытий на основе таких соединений используют различные способы, в том числе с помощью плазменного распыления катодов-мишеней.

Перспективным направлением является получение катодов-мишеней из сложнолегированных сплавов для ионно-плазменных испарительных систем с применением тепловых и деформационных методов воздействия на материалы (индукционная плавка, получение слитков, дробление и размол, прессование в заготовки, спекание, изготовление катода-мишени).

На основании ранее выполненных исследований определены композиции силицидных покрытий, включающие различные их комбинации. Наиболее оптимальными с технологической и ценовой точек зрения являются сочетания силицидов титана, никеля, хрома, молибдена и вольфрама. Для реализации возможностей изготовления катодов определены основные группы технологических принципов, включающих аналитические, металлургические, литейные, деформационные и термические.

Важнейшим является принцип подбора химического состава сплавов на основании рассмотрения диаграмм состояния двухкомпонентных и многокомпонентных металлических систем [1, 2].

Например, для покрытий с наиболее высокими служебными характеристиками (износостойкость, прочность, тепло- и жаростойкость, коррозионная устойчивость) подходят композиции из титана, никеля, хрома, железа, молибдена, вольфрама и их силицидов. Примером выбора исходного химического состава может служить диаграмма состояния системы титан-кремний.

В системе Ti-Si представляют интерес с точки зрения служебных свойств концентрационные сечения в интервале 7–55 мас. % кремния [2]. В соответствии с этими соображениями для получения материалов, содержащих силициды титана, на диаграмме состояния представляет интерес концентрационный интервал от 10 до 27% содержания кремния. Для силицидов хрома удовлетворяет заданным условиям содержание кремния от 8 до 52%. Значительный интерес в качестве жаростойких материалов представляют силициды молибдена и вольфрама [2].

Согласно анализу диаграмм состояния систем кремний – переходные и тугоплавкие металлы, определен ряд перспективных литых композитов на основе комплексных силицидов (см. таблицу).

Составы перспективных литых комплексных силицидов

Химический состав мас. %					
Ti	Ni	Cr	Mo	W	Si
50	20	–	–	–	30
–	20	60	–	–	20
30	20	30	–	–	20
25	15	–	35	–	25
40	15	–	–	20	25

Главным принципом металлургической группы, положенным в основу разработки составов силицидных покрытий с заданными свойствами, является учет термодинамических параметров, образующихся при металлургическом синтезе фаз. Поскольку в данной разработке будем использовать твердые растворы и химические соединения компонентов (интерметаллиды), то суммарной термодинамической характеристикой их может служить теплота образования при жидкофазных реакциях. Анализ показал, что все рассматриваемые интерметаллические соединения кремния имеют высокую положительную теплоту образования, лидерами среди которых являются силициды титана, далее следуют силициды молибдена и вольфрама, затем хрома и замыкают ряд силициды никеля. Например, силициды меди очень непрочны и занимают узкий концентрационный интервал на диаграмме, напротив, область твердых растворов достаточно широка, поэтому имеет смысл разрабатывать сплавы на связывающей основе твердого раствора кремния в меди. Это утверждение в полной мере относится и к никелю. Из всех рассматриваемых металлов никель имеет самую большую область твердых растворов кремния, что делает их с учетом сказанного выше наиболее подходящей матричной основой для создания литых композитов с включениями прочных и твердых силицидов титана, хрома, вольфрама, молибдена и их сочетаний [1, 2].

Необходимо отметить, что силициды титана и тугоплавких металлов слабо или практически не взаимодействуют с жидким никелем, что делает его расплав прекрасной средой для синтеза тугоплавких силицидов и получения литых композитов.

Примером может служить получение литого силицида следующего состава: Ti – 50%, Ni – 20, Si – 30%. Химический состав сплава выбран на основании принципа анализа диаграмм состояния систем [2]. Используя принцип учета термодинамических параметров, установлено, что реакции образования силицидов титана сильно экзотермические, также высоки теплоты растворения элементов друг

в друге у данного состава. Исходя из этого, процесс синтеза можно вести с быстрым параллельным подъемом температуры по ходу реакции как за счет нагрева компонентов извне, так и за счет выделения внутренней теплоты. Если скорость подъема температуры за счет внешнего источника лимитирован его возможностями и тепловыми параметрами реакционной зоны (тигля), то скорость подъема температуры за счет теплоты реакции лимитируется в основном порядком и темпом подачи реагентов, их удельной поверхностью (геометрией), уровнем предварительного подогрева.

В предельном случае разогрев реагирующей смеси можно довести до теплового взрыва. В случае приведенного сплава при начальной температуре исходного расплава 1900 К исходя из приближенных расчетов можно за счет теплоты растворения и реакции образования силицидов титана, при умеренном подогреве вводимого компонента до 600–700 К получить подъем температуры за очень короткое время до 2400–2500 К, что достаточно для расплавления всех образовавшихся силицидов, даже несмотря на отрицательную теплоту нагрева и плавления исходных компонентов. Таким образом, возможно получить полностью жидкофазный гомогенный сплав, из которого при охлаждении выделяются кристаллы Ti_5Si_3 , а затем закристаллизуется матрица в виде эвтектики из твердого раствора кремния в никеле и низшего силицида никеля. Структура такого сплава будет состоять из матрицы сравнительно пластичных, но прочных никелевых фаз с вкраплениями твердого, прочного и в меру хрупкого силицида титана.

Из описанного принципа вытекает, что порядок плавки, время и темп ввода компонентов имеет большое, часто решающее значение для проведения синтеза. На примере силицида $Ti - 50\%$, $Ni - 20$, $Si - 30\%$ разработана технологическая схема проведения его получения прямым сплавлением.

Известно, что титан интенсивно окисляется при нагреве начиная с температуры 750 К, а в расплавленном состоянии активно растворяет кислород [3]. Расплавленный титан активно взаимодействует с большинством известных огнеупоров за исключением графита высокой плотности, поэтому выгоднее плавку титана проводить в вакуумной печи.

Никель допускает плавку в любых атмосферах, в том числе воздушной, хотя довольно интенсивно растворяет в себе кислород. Эта проблема легко решается глубоким раскислением расплава любым способом. С большинством огнеупоров никель не взаимодействует или взаимодействует слабо, однако науглероживается в контакте с графитосодержащими материалами до предела растворимости углерода. Начинать синтез с получения исходного никелевого расплава технологически просто, однако при малом содержании в заданном составе сплава и высокой плотности он будет занимать малую часть объема реакционной зоны и иметь небольшое теплосодержание, что не позволит достичь высокой скорости реагирования компонентов и, в свою очередь, не обеспечит необходимую температуру синтеза [3, 4].

Кремний более выгоден как основа исходного расплава. Его взаимодействие с газами минимально, с кислородом жидкий кремний взаимодействует с образованием летучих субоксидов, которые таким образом не загрязняют расплав и его поверхность [4]. По отношению к примесям он является, как правило, раскислителем, что обеспечивает расплаву относительную чистоту. Кремний не растворяет в себе углерод, и хотя реакционно взаимодействует с ним при плавке в графитосодержащих огнеупорах с образованием карбида, реакция быстро затухает и стенки тигля покрываются изолирующим слоем карбида кремния, благодаря которому возможны длительные выдержки расплава. Жидкий кремний имеет малую плотность, занимая значительный реакционный объем, допускает высокие технологические перегревы без риска ухудшения качества расплава, что позволяет проводить синтез силицидов с подъемом до очень высоких температур.

На основании изложенного выше и применительно к комплексному силициду титан-никель-кремний предложена следующая схема синтеза: реактор – графитовый тигель, газовая атмосфера – нейтральная (аргон). Первая стадия – получение расплава кремния и его перегрев до 1900 К, вторая стадия – подогрев никеля и титана в пластинах толщиной 0,003–0,005 м до 700 К, третья стадия – последовательный непрерывный ввод никеля, затем титана в исходный расплав кремния одновременно с максимальным подводом энергии извне до достижения температуры 2500 К (оптическая пирометрия), четвертая стадия – по достижении температурного максимума перемешивание полученного расплава при выпуске и охлаждение со скоростной кристаллизацией (закалка из жидкого состояния). Конечной целью данного литейного процесса является получение слитка комплексного силицида с плотной, однородной, термонапряженной структурой, который легко поддается процессу дробления и измельчения для последующей обработки деформационными методами.

Лабораторные методики, основанные на металлургических принципах проведения синтеза, прошли экспериментальное апробирование в процессе плавки комплексного силицида. В качестве плавильного

агрегата использовали инвертор электрической мощностью 30 кВт и частотой генерации в диапазоне 8–50 кГц, позволяющий развивать удельную тепловую мощность в садке до 250 Дж·с/см³. Это обеспечивает скоростное расплавление исходных материалов, что крайне необходимо для синтеза силицидов (рис. 1).

Для обеспечения вложения в садку столь высокой мощности использован электродный графит, из которого был изготовлен плавильный тигель с огнеупорной теплоизоляцией на основе карбида кремния, способной работать при температурах до 2500 К минимально необходимое время. Толщину огнеупорной теплоизоляции выбрали из расчета падения температуры по сечению до 1300–1500 К на внешней поверхности. Для дальнейшего сокращения теплового потока потерь в наружном слое плавильного реактора использовали высокоэффективную среднетемпературную диэлектрическую теплоизоляцию в виде мулитовой ваты с предельной рабочей температурой 1500 К (рис. 2). Такая теплоизоляция обеспечила минимум тепловых потерь.

Литейные технологические принципы, использованные в разработке, позволили решить серьезную проблему: процесс разлива жидкого силицида из плавильного тигля в литейную форму. Эту операцию необходимо проводить в кратчайшее время, учитывая высокую скорость снижения температуры, начиная с 2500 К. Оптимальная форма слитка для дальнейшей обработки деформационными методами, в частности операциями дробления, это как можно более тонкая протяженная пластина, к тому же, отвечающая принципу скоростной кристаллизации (закалка из жидкого состояния) для обеспечения изоморфной макро- и микроструктуры. Такие требования вытекают из необходимости последующего дробления слитка до мелких фракций частиц (менее 10⁻⁴ м) при минимизации выкрашивания отдельных фаз и облегчения процесса измельчения за счет высоких внутренних напряжений в слитке. Высокую скорость теплосъема от расплава может обеспечить металлическая форма, технология которой разработана достаточно хорошо и не вызывает затруднения.

Затруднения вызывает заполнение такой формы высокотемпературным расплавом. Для практической реализации был использован способ с помощью смыкающегося кокиля. При температурах разлива силицидных сплавов, несмотря на их пониженную теплопроводность, развивается огромный температурный перепад между поверхностью расплава и стенкой формы, что может привести к горячей диффузионной сварке в зоне контакта или подплавлению пограничного слоя, поэтому желательно применение теплоизолирующих покрытий рабочих поверхностей кокиля (рис. 3).

В группу деформационных технологических принципов процесса изготовления катодов-мишеней входят методы дробления и размалывания слитка, фракционирования частиц, приготовления



Рис. 1. Инверторная плавильная установка



Рис. 2. Плавильный тигель



а



б



в

Рис. 3. Технология разлива силицида в слитки:

а — процесс заливки; б — после кристаллизации и раскрытия кокиля; в — готовые слитки

порошковых смесей и их компактирования в заготовки требуемых размеров. Измельчение кусковых материалов осуществляют в различных мельницах и дробилках инерционного типа: копровых, шаровых, центробежных, молотковых, струйных и др. В лабораторном варианте наиболее просты и универсальны для грубого дробления (до размеров частиц 0,005 м) копры, а для мелкого помола (до размеров $5 \cdot 10^{-5}$ м) – шаровые мельницы типа «пьяная бочка» и центробежные мельницы с крупностью помола до $5 \cdot 10^{-6}$ м. Мелющие тела для помола силицидов должны иметь высокую прочность и твердость поверхности. С этой целью использовали закаленную шарикоподшипниковую сталь ШХ15 и высоколегированный чугун карбидного класса. Получаемые крупы и порошки силицида имели небольшую засоренность намолотом, которую устраняли селективной магнитной сепарацией. Измельчение слитков такими способами приводит к механоактивации полученных порошков, что значительно облегчает последующие процессы компактирования и спекания заготовок.

Принципы фракционирования, т.е. разделения круп и порошков на группы частиц, имеющих геометрические размеры, укладываемые в заданный диапазон, разделяются на механические, основанные на прохождении или задерживании частиц на окнах разделительной решетки (сите) при движении под действием динамических сил, и на гидродинамические, основанные на различии в скоростях движения частиц разного размера в газообразных и жидких средах [5].

К первой группе относится фракционирование на механических ситах различной конструкции, ко второй – в пневматических и гидравлических сепараторах. Для данной разработки применимы процессы сепарации обеих групп, в зависимости от размера выделяемой фракции. Для выделения частиц размерами более 10^{-4} м использовали механические встряхивающие проволочные сита с простым и сложным движением, достаточно эффективно работающие с прочными, неслипающимися металлическими и керамическими порошками. Более мелкую фракцию получали на пневматическом сепараторе. Приготовление порошковых смесей, составляющих основу прессованных заготовок катодов, осуществляли в лабораторной мельнице типа «пьяная бочка», заменив помольные тела миксирующими [5].

Важной составляющей технологии изготовления катодов является процесс компактирования смеси порошков силицидов в заданную форму с требуемой технологической прочностью. При этом необходимо обеспечить минимальную пористость готового изделия и его размерную точность.

Следует отметить, что комплексные силициды являются твердыми и прочными материалами, по свойствам приближающимися к керамике, поэтому компактирование их порошков в плотные, прочные заготовки вызывает значительные сложности, так как методику получения изделий из керамических смесей в классическом варианте применить к ним затруднительно. Это определяется ограниченностью использования пластификаторов вследствие трудности их удаления при невысоких температурах спекания силицидных композиций, а также недопустимости их остаточного содержания в готовых катодах.

Способы компактирования порошков по основным признакам можно разделить на процессы со статическим и динамическим приложением усилий и протекающие при комнатной или повышенной температуре.

К статическим относятся прямое, обратное и встречное прессование свободно насыпанных или предварительно уплотненных смесей. Ранее выполненные исследования показали невысокую эффективность прямого холодного прессования силицидных композиций, в том числе уплотненных предварительной вибрацией, даже при удельных давлениях до 250 МПа [5]. Такие давления предъявляют высокие требования к оснастке, которая должна быть изготовлена из термообработанной высокопрочной штамповой стали и изолирована от прессовки пластичной прокладкой для предупреждения задиров. Несколько улучшило результат применение ударного прессования на гравитационном копре предварительно спрессованной заготовки. Удельная энергия ударного импульса достигала 200 Дж/см^3 , что являлось предельно возможным для установки и оснастки, но явно недостаточным для существенного увеличения плотности и прочности получаемой заготовки. Тем не менее, следует отметить благоприятное воздействие фронта ударной волны, проходящей через прессовку, вызывающего перегруппировку ее частиц в более плотную упаковку.

Увеличения плотности спрессованных заготовок можно достигнуть, как показали ранее выполненные исследования, выбором рационального фракционного состава исходной порошковой смеси, определяемого путем компьютерного 3D- моделирования плотных упаковок квазисферических частиц [6].

В результате выполненных расчетов был получен следующий оптимальный фракционный состав: частицы диаметром 0,63–0,50 мм – 74,1%; 0,25–0,20 мм – 5,3; 0,16–0,10 мм – 1,1; 0,10–0,08 мм – 4,7%, что в сумме составляет 85,2% от общего объема прессовки с абсолютной плотностью. Оставшийся

свободный объем 14,8% был заполнен микропорошком с размером частиц менее 10 мкм, полученном размолем фракций 0,25–0,10 мм на планетарной мельнице.

Трудность достижения прочного сцепления между частицами силицидов при холодном прессовании заключается в отсутствии пластичности у таких материалов, что не дает возможности существенно увеличить площадь ювенильных поверхностей, позволяющих элементам свариваться между собой контактными мостиками. Для достижения лучшего результата предложен вариант нагрева прессуемой смеси до температур, обеспечивающих достаточный уровень пластических свойств частиц, необходимый для значительного роста их контактных поверхностей. Такой нагрев дает несколько одновременных положительных эффектов: релаксация термических напряжений, возникших при скоростной кристаллизации исходного слитка, приведение фазовой структуры в равновесное состояние, снятие механического наклепа, возникшего в результате предыдущих операций обработки и появившегося при текущем прессовании, разупрочнения отдельных фазовых составляющих сплава.

Для комплексных силицидов с матрицей на основе твердого раствора никеля такой нагрев обеспечивает необходимый комплекс свойств при температуре 1200–1300 К, однако в таких условиях поверхность этих сплавов склонна к окислению, поэтому предельная температура нагрева в среде газов технической чистоты (включая инертные) не должна превышать 1050 К. При осуществлении процесса динамического прессования на гравитационном копре под действием ударных механических импульсов температуру предварительного подогрева можно снизить и получить ее подъем за счет работы, производимой бойком. Согласно данным [5], примерно половина этой работы выделяется в виде теплоты в деформируемом материале, что может обеспечить подъем температуры за фронтом ударной волны на сотни градусов при суммарной энергии импульса 15–20 кДж.

Исходя из изложенного выше, для получения заготовок катодов установок напыления покрытий предложен вариант горячего прессования порошка силицида в статическом режиме (рис. 4).

Нагрев оснастки с загруженной смесью может осуществляться в агрегатированной печи сопротивления или индукционным методом прямо на прессовом оборудовании. Пресс-форма должна быть из жаропрочных сплавов, с предельной температурой работы не ниже 1000 К. Пресс должен обеспечивать удельное давление на порошковую смесь в диапазоне 100–250 МПа и выдержку заготовки под нагрузкой при охлаждении до 600–700 К. Затем давление снимается, производится окончательное естественное охлаждение оснастки и извлечение полученной заготовки.

На рис. 5, а, б показаны общий вид лабораторной установки горячего статического прессования и опытный образец заготовки катода из комплексного силицида.

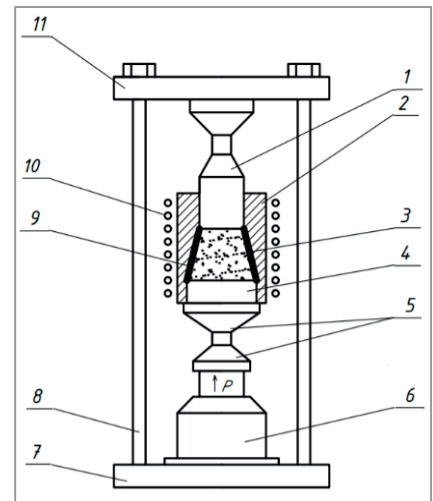
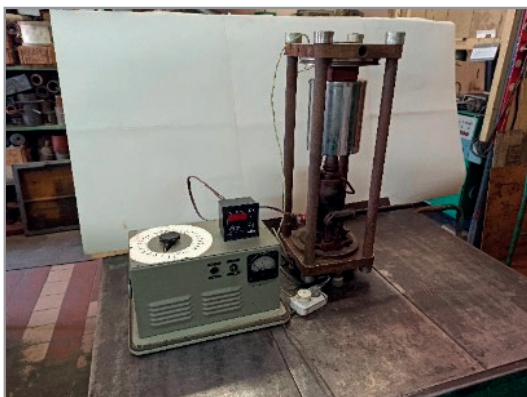


Рис. 4. Схема горячего статического прессования при 800–1000 К:
1 – подвижной пуансон; 2 – матрица;
3 – порошок; 4 – подпятник;
5 – нижняя опора; 6 – гидравлический домкрат; 7 – нижняя траверса;
8 – связи прессовой рамы; 9 – смазка;
10 – индуктор; 11 – верхняя траверса



а



б

Рис. 5. Лабораторная установка горячего статического прессования (а) и образец заготовки катода из комплексного силицида (б)

Таким образом, используя процессы, основанные на деформационных принципах, возможно получение заготовок с достаточной технологической прочностью, однако недостаточной для эксплуатации на рабочих режимах установок для напыления. Для обеспечения эксплуатационной прочности и необходимой электропроводности катодов, работающих в условиях контакта с электрической дугой при требовании равномерного ионного распыления, требуется реализация дальнейшего упрочнения заготовки катода, основанного на термических принципах обработки материалов.

Метод спекания из группы термических принципов является универсальным способом увеличить прочность порошковых заготовок практически любых материалов как хрупких, так и пластичных, как металлических, так и керамических, поэтому принимается как базовый для разработки технологии изготовления катодов-мишеней из порошков силицидов.

Однако необходимо отметить, что термообработка спеканием приводит к уменьшению первоначальных геометрических размеров заготовки за счет сокращения площади кооперативных поверхностей в объеме и усадки готовых изделий, увеличивающейся с ростом температуры и продолжительности выдержки. Из [7,8] следует, что порошковые заготовки из комплексных силицидов желательно спекать в контакте с графитовыми или карбидными материалами в инертной или восстановительной атмосфере (азот в данном случае не является нейтральным газом). Самым простым технологическим решением в данном случае является проведение термообработки в закрытом контейнере с засыпкой из графитовой стружки (рис. 6) [9].

Для спекания силицидных композиций с матрицей на основе твердых растворов кремния в никеле и бедных по кремнию эвтектик рациональными температурами обработки являются величины в интервале 950–1100 К, при длительностях выдержки $3 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$ с. Также желательной является параллельная с нагревом и охлаждением продувка контейнера инертным газом (технический аргон). Отметим, что термообработка при температурах ниже 800 К применительно к силицидным материалам нецелесообразна, так как не дает заметного положительного эффекта.

Таким образом, на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований усовершенствована литейно-деформационная технология получения катодов-мишеней (рис. 7).

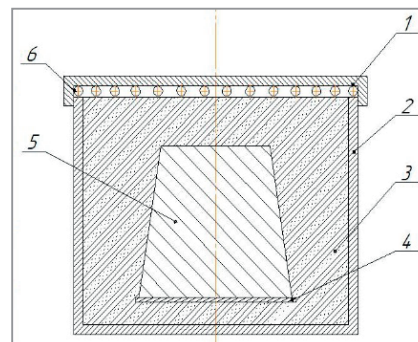


Рис. 6. Схема спекания заготовки катода:

- 1 – стальная крышка; 2 – стальной корпус; 3 – графитовая засыпка; 4 – пластина из нержавеющей стали; 5 – заготовка; 6 – газовый затвор

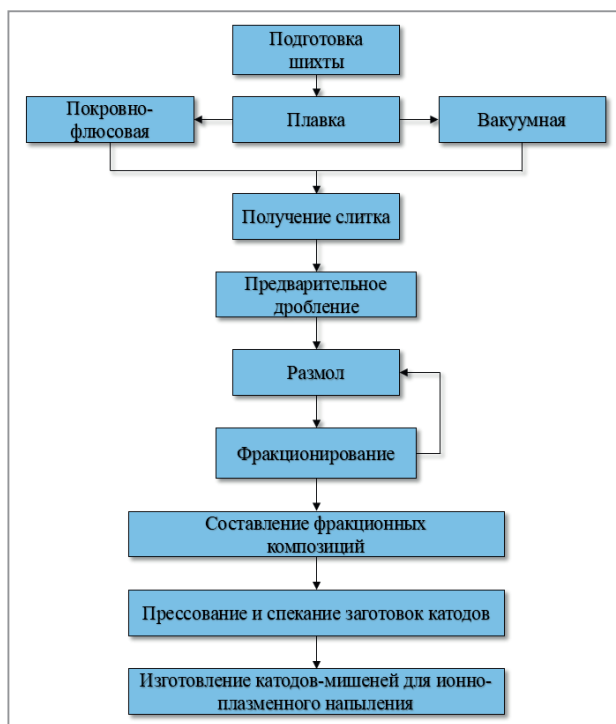


Рис. 7. Технологическая схема получения катодов-мишеней для вакуумных ионно-плазменных источников литейно-деформационным методом

Выводы

1. На основании анализа диаграмм состояния двойных сплавов переходных и тугоплавких металлов с кремнием выбраны наиболее перспективные составы силицидных композиций для получения покрытий ионно-плазменным напылением.
2. Определены основные технологические принципы для реализации технологии изготовления катодов, позволяющие получить данные изделия, отвечающие эксплуатационным требованиям, включающие следующие группы: аналитические, металлургические, литейные, деформационные и термические.
3. Выработаны технологические рекомендации для конкретных процессов изготовления заготовок катодов-мишеней.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hume-Rothery, W.** Metallurgical equilibrium diagrams / W. Hume-Rothery. London: The Institute of Physics, 1952. 400 с.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: В 3-х т.: Т. 3. Кн. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2000. 448 с.
3. **Гельд, П. В.** Силициды переходных металлов четвертого периода / П. В. Гельд, Ф. А. Сидоренко, А. М. Ефимов. М.: Металлургия, 1971. 584 с.
4. **Бережной, А. С.** Кремний и его бинарные системы / А. С. Бережной. Киев: Академия наук УССР, 1958. 250 с.
5. **Роман, О. В.** Прогрессивные способы изготовления металлокерамических изделий: Материалы к I Республ. конф. по порошковой металлургии / О. В. Роман [и др.]. Минск: Полымя, 1971. 170 с.
6. **Иванов, И. А.** Изготовление катодов-мишеней из композиционных силицидов для нанесения защитных покрытий с применением литейно-деформационной технологии / И. А. Иванов, А. Г. Слуцкий, В. А. Штейнерт и др. // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 68–75.
7. **Иванов, И. А.** Особенности получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников литейно-деформационным методом / И. А. Иванов [и др.] // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2019. Вып. 40. С. 90–95.
8. **Иванов, И. А.** Получение катодов-мишеней из силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников / И. А. Иванов [и др.] // Литье и металлургия. 2018. № 2 (91). С. 99–102.
9. **Иванов, И. А.** Технологические варианты получения катодов-мишеней из силицидов металлов для вакуумных ионно-плазменных источников / И. А. Иванов [и др.] // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2018. Вып. 39. С. 84–90.

REFERENCES

1. **Hume-Rothery W.** Metallurgical equilibrium diagrams. London: The Institute of Physics, 1952, 400 p.
2. *Diagrammy sostojanija dvojnih metallicheskih sistem* [State Diagrams of Binary Metal Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, 448 p.
3. **Gel'd P. V., Sidorenko F. A., Efimov A. M.** *Silicidy perehodnyh metallov chetvertogo perioda* [Silicides of transition metals of the fourth period]. Moscow, Metallurgija Publ., 1971, 584 p.
4. **Berezhnoj A. S.** *Kremnij i ego binarnye sistemy* [Silicon and its binary systems]. Kiev, Akad. nauk USSR Publ., 1958, 250 p.
5. **Roman O. V.** Progressivnye sposoby izgotovlenija metallokeramicheskikh izdelij [Progressive methods of manufacturing ceramic-metal products]. *Materialy k I Respublikanskoj konferencii po poroshkovej metallurgii = Materials for the I Republican Conference on Powder Metallurgy*. Minsk, Polymja Publ., 1971, 170 p.
6. **Ivanov I. A., Slutsky A. G., Sheynert V. A., Ivanov A. I., Bely A. N.** Izgotovlenie katodov-mishenej iz kompozicionnyh silicidov dlja nanesenija zashhitnyh pokrytij s primeneniem litejno-deformacionnoj tehnologii [Production of target cathodes from composite silicides for the deposition of protective coatings using casting-deformation technology]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 68–75.
7. **Ivanov I. A. i dr.** Osobennosti poluchenija katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov litejno-deformacionnym metodom [Features of obtaining cathodes-targets from complex silicides for vacuum ion-plasma sources by casting-deformation method]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 40, pp. 90–95.
8. **Ivanov I. A. i dr.** Poluchenie katodov-mishenej iz silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov [Production of target cathodes from silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 2 (91), pp. 99–102.
9. **Ivanov I. A. i dr.** Tehnologicheskie varianty poluchenija katodov-mishenej iz silicidov metallov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov [Technological Options for Obtaining Target Cathodes from Metal Silicides for Vacuum Ion-Plasma Sources]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 39, pp. 84–90.