

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОБРАЗЦОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАТОДОВ-МИШЕНЕЙ
ИЗ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ
ЛИТЕЙНО-ДЕФОРМАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ**

А. Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, **В. А. ШЕЙНЕРТ**, **К. А. МЕЛЬНИКОВ**
Белорусский национальный технический университет

В статье представлены обобщенные результаты исследований технологических особенностей изготовления составных катодов-мишеней из титансодержащих сплавов различными способами. С использованием литейно-металлургического варианта, включающего синтез сплавов на высокоскоростной плавильной установке с последующей заливкой металла в специальную форму, отработаны режимы изготовления составного катода-мишени. Экспериментально апробирован вариант литейно-деформационного способа изготовления катода-мишени, включающий получение слитка титансодержащего сплава с последующим его размолом в порошок требуемой фракции и дальнейшим горячим статическим прессованием катода-мишени. Подобраны составы сплава, содержащего титан, медь и алюминий. В лабораторных условиях изготовлены опытные образцы составных катодов-мишеней и проведены предварительные испытания.

***Ключевые слова:** титансодержащие сплавы, синтез, специальная форма, литой и прессованный катод, испытание*

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING
SAMPLES OF INDUSTRIAL CATHODES-TARGETS
FROM TITANIUM-CONTAINING ALLOYS BY CASTING-
DEFORMATION METHODS**

A. G. SLUTSKY, Ph. D in Technical Science, **V. A. SHEINERT**,
K. A. MELNIKOV
Belarusian National Technical University

The article presents the generalized results of studies of the technological features of the manufacture of composite cathodes-targets from titanium-containing alloys by various methods. Using the foundry-metallurgical version,

which includes the synthesis of alloys on a high-speed melting plant with the subsequent pouring of metal into a special mold, the modes of manufacturing a composite target cathode have been worked out. A variant of the casting-deformation method for manufacturing the target cathode has been experimentally tested, including the production of an ingot of a titanium-containing alloy with its subsequent grinding into powder of the required fraction and further hot static pressing of the target cathode. Alloy compositions containing titanium, copper and aluminum were selected. In laboratory conditions, prototypes of composite cathodes-targets were made and preliminary tests were carried out.

Keywords: *titanium-containing alloys, synthesis, special mold, cast and pressed cathode, testing*

Введение. В настоящей работе обобщены результаты экспериментальных исследований процесса изготовления составных катодов-мишеней с использованием совмещенной литейно-деформационной технологии, суть которой заключается в получении слитка из титансодержащего сплава с последующим размолом в порошок требуемой фракции и дальнейшем горячем статическом прессовании заготовки катода-мишени.

Плавка титансодержащего сплава осуществлялась в высокоскоростной индукционной установке по методике, описанной в работах [1, 2]. В качестве шихтовых материалов использовали кристаллический кремний, электролитический никель и кусковой титан. Процесс осуществляли в соответствии со специально отработанной методикой, позволяющей минимизировать угар основных элементов сплава. Полученный расплав разливали в специальные формы, конструкция которых обеспечивала направленную кристаллизацию. В дальнейшем слитки подвергались дроблению и размолу в лабораторной мельнице с использованием стальных шаров (диаметром 8 мм и 35 мм), что обеспечило получение мелкой фракции размером менее 0,08 мм [2, 3].

На следующем этапе по методике, изложенной в работе [3], методом горячего статического прессования порошка из титансодержащего сплава были отработаны технологические режимы и получен опытный образец заготовки катода. 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 сплава 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 плотных упаковок сферических частиц и с помощью 3D моделирования гексагональной плотной упаковки определен размер и количество частиц для заполнения пустот вплоть до четвертого порядка с достаточным уровнем приближения, учитывающем 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 %.

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. Применительно к данному способу изготовления катода-мишени был апробирован вариант его пайки к тоководу. Для этого нижняя поверхность прессованного катода-мишени полировалась и к ней припаивался медный токовод. На рисунке 1 представлены фотографии полученного катода-мишени и его элементов.

Применительно к промышленной вакуумно-плазменной установке УВНИПА-1-2 со штатным стационарно плазменным ускорителем (СПУ) и геометрическим размерам составного катода-мишени разработана и изготовлена технологическая оснастка для получения опытных образцов методом литья (рисунок 2). Из стали предварительно был изготовлен токовод, имеющий специальный «ласточкин хвост» для соединения с катодом в процессе литья (рисунок 2, а).



Рисунок 1 – Элементы опытного образца катода-мишени для вакуумных установок:

а – прессованная заготовка катода; *б* – медный токовод;
в – готовый образец катода-мишени

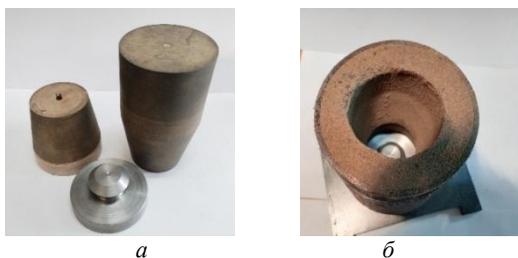


Рисунок 2– Технологическая оснастка (*а*) и форма в сборе (*б*) для получения составного катода-мишени методом литья

На основании анализа диаграмм состояния двухкомпонентных и многокомпонентных металлических систем был выбран сплав, обладающий высокими эксплуатационными свойствами, содержащий 50 % алюминия, 20 % меди и 30 % титана.

Известно, что процесс растворения титана при его добавках в жидкий расплав сопровождается значительным выделением тепла за счет растворения элементов друг в друге, а также поглощением газов и в первую очередь водорода. Это обстоятельство учитывалось при разработке варианта ввода компонентов шихты в процессе плавки.

На основании вышеизложенного и применительно к выбранному сплаву (алюминий-медь-титан) использована следующая схема синтеза в реакторе (графито-шамотный тигель): первая стадия включа-

ет получение расплава меди и ее перегрев до 1200 °С, вторая стадия – подогрев титана в пластинах до 500 °С, третья стадия – последовательный непрерывный ввод титана в расплав меди и добавки алюминия, четвертая стадия – по достижении температурного максимума перемешивание полученного расплава и быстрая разливка в литейную форму. Конечной целью этого литейного процесса является получение отливки катода. 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 обеспечило скоростное расплавление исходных материалов, что крайне необходимо для синтеза титансодержащих сплавов. После кратковременного перегрева полученного сплава осуществлялась заливка литейной формы и велось наблюдение процесса его охлаждения. После полного охлаждения и обрезки прибыльной части отливки было обнаружено значительное количество газо-усадочных пор, что является характерным для титановых сплавов. Далее был использован вариант повторного переплава, что позволило получить плотный слиток промышленного составного катода-мишени (рисунок 3 *а, б*).



Рисунок 3 – Фотографии промышленного образца составного катода-мишени, полученного двойным переплавом титансодержащего сплава:
а – литая заготовка; *б* – образец промышленного составного катода

Ниже представлены результаты предварительных испытаний промышленного образца составного катода – мишени. Для этого использовался стационарный плазменный ускоритель (СПУ) с экспериментальным образцом составного многокомпонентного катода-

мишени из комплексно-легированного сплава, содержащего титан, алюминий, медь. Целью испытаний являлось определение режимов поджига и стабильного горения дугового разряда в СПУ и нанесение по установленным режимам покрытий на основе данного сплава, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства (прочность, жаростойкость, износостойкость). Для проведения испытаний использовалась промышленная вакуумно-плазменная установка УВНИПА-1-02 (УРМЗ.279.079) со штатным СПУ с установленным в нем испытуемым образцом катодом-мишени. Испытания проводились по следующим режимам: напряжение на поджигающем электроде – 600–800 В; частота следования поджигающих импульсов – 3 Гц; напряжение дугового разряда – 50–70 В; ток дугового разряда – 55–90 А; давление в камере установки – $5 \cdot 10^{-3}$ Па; время работы СПУ – 30–60 мин.

Применительно к выбранному составу сплава был использован литейно-металлургический вариант его синтеза на инверторе мощностью 30 кВт и частотой генерации в диапазоне 8–50 кГц, позволяющий осуществлять скоростное расплавление исходных материалов. Заливка полученного сплава осуществлялась в специальную литейную форму, в которую предварительно вставляли стальной токовод.

Получены следующие предварительные результаты: СПУ с экспериментальным образцом составного многокомпонентного катода-мишени отработал по установленным режимам без замечаний; получены образцы покрытий на деталях из стали Р6М5 и 12Х18Н10Т для последующего проведения исследований свойств. В качестве примера на рисунке 4 представлены фотографии общего вида опытного образца составного катода-мишени из титансодержащего сплава после предварительных испытаний.

Таким образом, в результате выполненных исследований отработаны особенности получения промышленного составного катода-мишени литейно-деформационной технологией. Изготовлены опытные образцы и проведены предварительные испытания на промышленной вакуумно-плазменной установке УВНИПА-1-02 ГНУ «Физико-технический институт» НАН РБ, которые дали положительные результаты.



a



б

Рисунок 4 – Общий вид опытного образца составного катода-мишени из титансодержащего сплава после испытаний:
a – на начальной стадии; *б* – на конечной стадии

Список литературы

1. 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.

2. Даничев, А. О. Исследование особенностей процесса изготовления опытных образцов промышленных катодов-мишеней литейными технологиями / А. О. Даничев, И. В. Якимчук, И. В. Котов // Материалы XXV респ. студ. науч.-техн. конф. Минск, 18-19 апреля 2024 г. – Минск, БНТУ, 2024. – С. 22–26.

3. Сравнительный анализ технологий получения слитков из комплексных силицидов для катодов-мишеней / А. А. Оленцевич [и др.] // Материалы XXIV Респ. студ. науч.-техн. конф. Минск, 21-22 апреля 2023 г. – Минск, БНТУ, 2023. – С. 40–42.

References

1. Izgotovlenie katodov-mishenej iz kompozicionnyh silicidov dlya nanoseniya 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 // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2021. – No. 2. – P. 68–75.

2. Danichev, A. O. *Issledovanie osobennostej processa izgotovleniya opytnyh obrazcov promyshlennyh katodov-mishenej litejnymi*

tehnologiyami [Study of the features of the process of manufacturing prototypes of industrial target cathodes using foundry technologies] / A. O. Danichev, I. V. YAKimchuk, I. V. Kotov // *Materialy XXV resp. stud. nauch.-techn. konf. Minsk, 18-19 April 2024.* – Minsk, BNTU Publ., 2024. – P. 22–26.

3. Sravnitel'nyj analiz tekhnologij polucheniya slitkov iz kompleksnyh silicidov dlya katodov-mishenej [Comparative analysis of technologies for producing ingots from complex silicides for target cathodes] / A. A. Olencevich [et al.] // *Materialy XXIV resp. stud. nauch.-techn. konf. Minsk, 21-22 April 2023.* – Minsk, BNTU Publ., 2023. – P. 40–42.

Поступила 23.10.2024

Received 23.10.2024