



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-68-75>
УДК 669.714, 621.718

Поступила 12.04.2021
Received 12.04.2021

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КАТОДОВ–МИШЕНЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ СИЛИЦИДОВ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИТЕЙНО–ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

И. А. ИВАНОВ, А. Г. СЛУЦКИЙ, В. А. ШЕЙНЕРТ, А. И. ИВАНОВ, А. Н. БЕЛЫЙ,

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.

E-mail: deanmtf@bntu.by

В статье обсуждаются результаты изготовления многокомпонентных расходоуемых катодов вакуумных электродуговых испарительных установок. Для получения слитков комплексного силицида, как исходного сырья для изготовления катодов-мишеней, предложено использовать индукционную плавку чистых металлических шихтовых материалов в атмосфере аргона.

Методика позволила получать слитки комплексного силицида состава, близкого к расчетному и плотности не менее 93%. Дальнейшая формовка катода происходит при контроле фракций порошка по их процентному соотношению при усилии прессования не менее 50 т. Полученные результаты сравниваются с СВС-методом изготовления катодов идентичного состава.

Ключевые слова. *Композиционные силициды, восстановительная и индукционная плавка, размол слитков, прессование, термообработка, катоды-мишени, испытания.*

Для цитирования. *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. Шейнерт, А. И. Иванов, А. Н. Белый // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 68–75. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-68-75>.*

PRODUCTION OF TARGET CATHODES FROM COMPOSITE SILICIDES FOR APPLYING PROTECTIVE COATINGS USING CASTING AND DEFORMATION TECHNOLOGIES

I. A. IVANOV, A. G. SLUTSKY, V. A. SCHEINERT, A. I. IVANOV, A. N. BELY,

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. E-mail: deanmtf@bntu.by

The article discusses the results of manufacturing multicomponent consumable cathodes of vacuum electric arc evaporation plants. To obtain ingots of complex silicide as a raw material for the manufacture of target cathodes, it is proposed to use induction melting of pure metal charge materials in an argon atmosphere.

The method made it possible to obtain ingots of complex silicide with a composition close to the calculated one and a density of at least 93%. Further forming of the cathode takes place when controlling the powder fractions by their percentage ratio with a pressing force of at least 50 tons. The results obtained are compared with the SHS method of manufacturing cathodes of identical composition.

Keywords. *Composite silicides, reduction and induction melting, ingot grinding, pressing, heat treatment, target cathodes, testing.*

For citation. *Ivanov I. A., Slutsky A. G., Scheinert V. A., Ivanov A. I., Bely A. N. Production of target cathodes from composite silicides for applying protective coatings using casting and deformation technologies. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 68–75. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-68-75>.*

Введение

Современные вакуумные ионно-плазменные испарительные устройства позволяют использовать в качестве материала расходоуемого катода-мишени сплавы металл-металл и металл-неметалл [1]. Такие мишени дают возможность формировать достаточно сложные по составу покрытия, используя только один источник высокоионизированной низкотемпературной плазмы [2].

Достоинства таких катодов-мишеней очевидны – это экономия энергии при работе вакуумной установки (ВУ), уменьшение времени подготовительных операций, упрощение технологической компоновки

ВУ нанесения покрытия, снижение количества нежелательной газовой нагрузки в вакуумной камере за счет уменьшения количества разъемных фланцевых соединений, упрощение работы оператора ВУ за счет уменьшения количества контролируемых параметров процесса. Краткий обзор технологических методов изготовления таких катодов-мишеней с анализом их преимуществ и недостатков выполнен в [3]. Показано, что изготовление катодов-мишеней из сплавов металл-металлоид, особенно с большим содержанием металлоида, может осуществляться разными методами, среди которых наиболее широкое распространение получили способы литья и порошковой металлургии. Данные методы позволили получать сложнолегированные и относительно дешевые катоды-мишени, использование которых позволяло обеспечить постоянство состава плазменного потока и повторяемость свойств покрытий, возможность введения в состав катода-мишени таких элементов, как бор, кремний и др.

Известны ранние работы по изготовлению катодов титан-кремний для электродуговых вакуумных испарительных устройств методом индукционной плавки в контролируемой среде инертного газа. Они были направлены на получение катодов с максимально возможным содержанием кремния (более 66%) [4].

Опыт использования таких катодов показал, что, несмотря на хорошие эксплуатационные характеристики, получаемые сплавы титан-кремний не обладают высокой плотностью, имеют значительное количество макро- и микродефектов, склонны к образованию микротрещин в процессе эксплуатации, что способствует неустойчивому горению дугового разряда на поверхности катода. Эксплуатация катодов позволила сформулировать основные требования к катодам-мишеням вакуумных ионно-плазменных испарительных устройств [5].

Постановка задачи исследования

Ранее авторами проведены экспериментальные работы по исследованию процесса получения катодов-мишеней на основе сплавов титана с кремнием и переходными металлами методом СВС. Термодинамические расчеты позволили обосновать составы исходной шихты, которые допускают без внешнего подогрева реализовывать процессы металлотермического восстановления для получения безуглеродных катодов-мишеней титан-кремний- переходный металл. В качестве добавки к шихте использовали оксиды металлов, которые позволили увеличить термичность СВС-процесса и увеличить выход титана и кремния [6]. Расчеты показали, что наиболее значительное выделение количества тепла обеспечивают реакции восстановления алюминием, кальцием и магнием [7]. При этом титан можно восстанавливать из соединения только за счет алюминия, кальция и магния. Однако использование магния в качестве восстановителя возможно при повышенных давлениях (автоклавный метод), что требует дополнительных затрат. Расчеты также показали, что термичность восстановительных смесей $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}$ ниже критического порога и требует внешнего подогрева шихты для получения компактного слитка.

Был отработан вариант плавки комплексных силицидов на основе титана и никеля металлотермическим восстановлением компонентов из оксидной фазы [8]. За счет высокой термичности восстановительных смесей на основе оксидов, никеля и титана, порошка алюминия и кристаллического кремния процесс плавки силицида можно осуществлять без предварительного подогрева. При этом использование в составе смеси вместо кристаллического кремния силикокальция (СК30) позволило не только заменить часть алюминия, но активизировать процесс восстановления титана и никеля.

На основании выявленных особенностей восстановительной плавки комплексных силицидов было скорректировано соотношение в шихте оксидов титана и никеля, что позволило получать слитки комплексного силицида по своему химическому составу, близкие к расчетным.

Разработана методика получения комплексных силицидов, содержащих медь, титан, никель, и проведены их структурные исследования [8,9]. С использованием данной методики изготовлены и прошли апробацию катоды-мишени из сплавов Cu-Si, Ti-Cu-Si, Ti-Ni-Si.

Проведенные в комплексе исследования позволили выявить некоторые ограничения применимости СВС-технологии и процесса изготовления катодов-мишеней из комплексных силицидов. Недостатком СВС-метода является то, что он может быть реализован в ограниченном диапазоне концентраций компонентов мишеней, поскольку инициирование и прохождение реакции горения возможно только при составах реакционных смесей, имеющих достаточную термичность. При этом процесс сопровождается интенсивным газовыделением и порообразованием, для предотвращения которого необходимо дополнительное прессование шихты, что усложняет технологический процесс производства катодов. Кроме того, из-за быстрого охлаждения после завершения реакции синтеза материал катода-мишени отличается

высоким уровнем внутренних напряжений, под действием которых часто происходит самопроизвольное разрушение мишеней в процессе эксплуатации.

С учетом изложенного выше интерес представляет изучение технологических особенностей получения катодов-мишеней из комплексных силицидов с использованием металлургических, литейных и деформационных методов.

Целью данной работы является обобщение результатов экспериментальных исследований процесса изготовления катодов-мишеней с использованием методов литья и совмещенной литейно-деформационной технологии, суть которой заключается в получении литой заготовки силицида с последующим ее размолом, прессованием и спеканием готового катода-мишени.

Обсуждение результатов исследований

В качестве объекта исследований были выбраны комплексные силициды на основе титана с никелем. Для их получения апробирован вариант высокоскоростной индукционной плавки аналогичных по составу силицидов с использованием чистых металлических шихтовых материалов. При этом для обеспечения качества получаемого слитка процесс осуществляли в нейтральной атмосфере аргона [9]. Это позволило обеспечить высокий (97%) металлургический выход и получить однородную макроструктуру слитка (рис. 1, *a*). Химический анализ показал, что силицид в среднем содержит 18% кремния, 30% никеля, 44% титана, а также некоторое количество углерода.

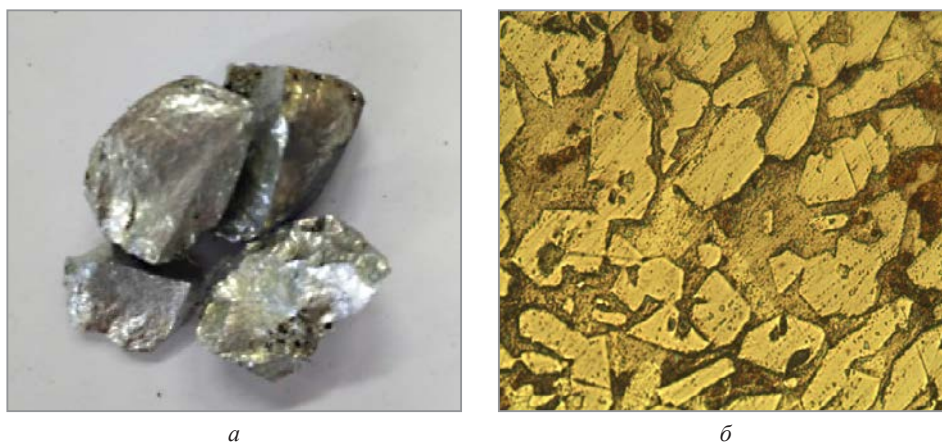


Рис. 1. Общий вид (*a*) и микроструктура (*б*) слитка комплексного силицида с никелем и титаном. $\times 500$

Микроструктура комплексного силицида состоит из равномерно распределенных мелких фаз, имеющих различную микротвердость (рис. 1, *б*). При этом разброс значений для темных и светлых фаз составил от 515 до 1220 МПа.

Ниже представлены результаты исследований процесса изготовления катодов-мишеней совмещенным литейно-деформационным способом, включающим получение слитка комплексного силицида высокоскоростной индукционной плавкой, последующее его дробление и размол в порошок до требуемой фракции и изготовление катода методом прессования с последующим его спеканием и припайкой стального токовода.

Плавку комплексного силицида осуществляли на индукционной установке по методике, описанной в работе [10]. В качестве шихтовых материалов использовали кристаллический кремний, электролитический никель и кусковые отходы титана. Полученный расплав разливали в открытую литейную форму, конструкция которой обеспечивала его направленную кристаллизацию. Изготовлена опытная партия литых образцов силицида и выполнен их химический анализ, который показал, что концентрация основных элементов, близкая к расчетной (кремний – 19,94%, никель – 29,56, титан – 50,48%).

В дальнейшем слитки силицида подвергали 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.

Была разработана и изготовлена технологическая оснастка, экспериментально 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, которые прошли термическую обработку по отработанному режиму, который обеспечил максимальную прочность (усилие 0,4 т) до

разрушения образца при температуре 800 °С. Термическая обработка при более низких температурах (до 600 °С) не оказала существенного влияния на прочность брикета [11].

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 плохой текучестью порошка силицида при полном отсутствии пластических свойств. Поэтому даже наращивание усилий прессования не позволяет снизить пористость 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.

На рис. 2 показан внешний вид исходного порошка комплексного силицида фракцией менее 0,08 мм, полученного методом электронной микроскопии.

При анализе изображения можно заключить, что порошок представлен случайным набором частиц размером от 5 до 80 мкм. При этом форма частиц сравнительно округлая с коэффициентом сферичности 0,6–0,8, вплоть до самых мелких фракций. При прессовании подобного порошка можно получить сравнительно плотные заготовки, однако практика показала, что достичь плотности, превышающей 85% от плотности литого сплава, не удалось даже при давлении 10 т/см². Такая плотность материала катода являлась недостаточной для обеспечения высоких технологических показателей в процессе распыления. Поэтому для достижения меньшей пористости получаемых заготовок применены теоретические принципы формирования плотнейших упаковок частиц, хорошо разработанных геометрически и математически. За базовую упаковку частиц была принята гексагональная плотная упаковка шаров одного диаметра с коэффициентом заполнения 0,74. Для того чтобы достичь плотности заполнения 0,95, была разработана 3D-модель, позволившая вычислить необходимое количество и размеры шаров второго, третьего и четвертого порядков, требуемое для заполнения пустот между шарами первого базового уровня. В результате выполненных расчетов был получен оптимальный теоретический фракционный состав применительно к порошку комплексного силицида [12].

В качестве пластификатора для увеличения подвижности смеси при прессовании использовали добавку поливинилового спирта. Приготовленную смесь в дальнейшем подвергали прессованию, а полученный образец катода подвергали термической обработке по разработанному режиму. Установлено, что плотность катода составила 93%, что примерно на 10% больше, чем у аналогичного образца, изготовленного из порошка комплексного силицида с размером частиц менее 0,08 мм.

С учетом результатов выполненных исследований была разработана технологическая схема изготовления промышленного катода-мишени методом прессования дисперсного порошка комплексного силицида (рис. 3).

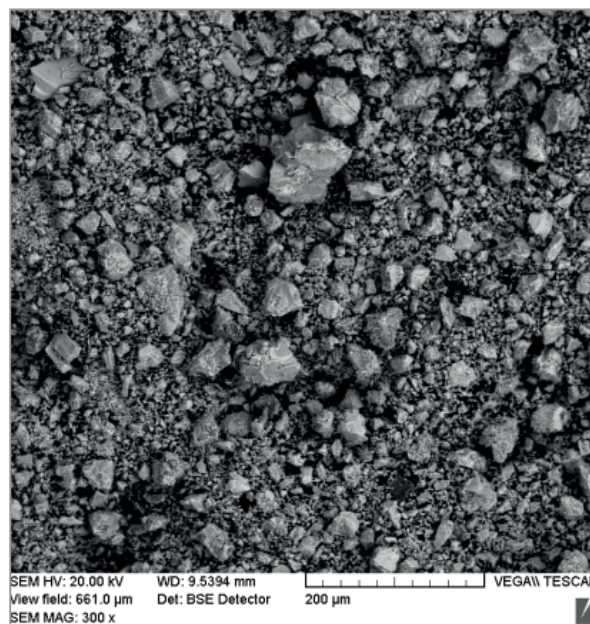


Рис. 2. Электронное изображение порошка комплексного силицида для прессования катода

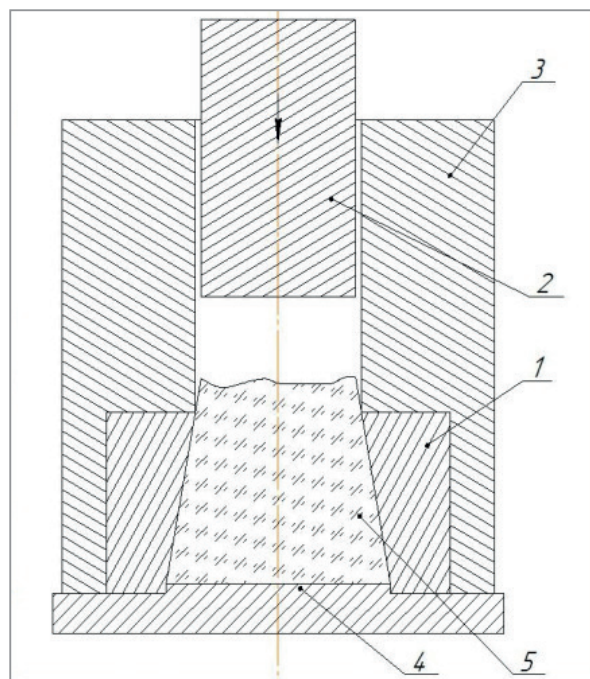


Рис. 3. Схема прессования катода-мишени из порошка комплексного силицида:
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – корпус пресс-формы; 4 – пята пресс-формы; 5 – порошок силицида

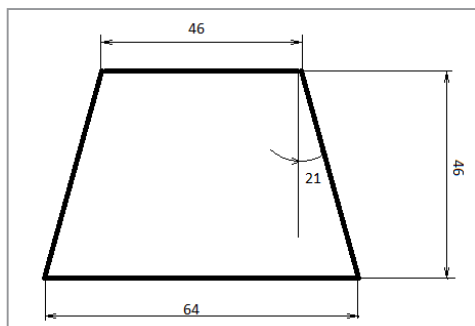


Рис. 4. Основные размеры катода-мишени для промышленной установки



a



б

Рис. 5. Технологическая оснастка для прессования катодов:
a – элементы оснастки;
б – элементы оснастки в сборе

Матрица 1, изготовленная из инструментальной стали, имеет форму катода-мишени (рис. 3). Корпус пресс-формы 3 позволяет центрировать пуансон 2 в процессе прессования порошка силицида 5. Для предотвращения попадания порошка между матрицей 1 и пятой пресс-формы 4 предусмотрен специальный выступ.

Изготовленные катоды были использованы для нанесения покрытий на установке вакуумно-плазменной обработки ВП-02М производства Vac Time. Геометрические размеры катода приведены на рис. 4.

Применительно к данным геометрическим размерам катода-мишени разработана и изготовлена технологическая оснастка для получения опытных образцов (рис. 5).

Для получения катодов-мишеней методом прессования применительно к конкретной установке по нанесению покрытий была изготовлена технологическая оснастка (рис. 5).

Были проведены расчеты усилия прессования, которые позволили определить необходимую навеску порошка комплексного силицида при получении заготовки катода. Расчетную навеску порошка силицида оптимального фракционного состава загружали вместе с пластификатором в матрицу и подвергали прессованию с усилием не менее 50 т. Полученную заготовку катода-мишени извлекали из матрицы, визуально осматривали и подвергали специальной термической обработке.

В дальнейшем нижнюю поверхность катода-мишени шлифовали и к ней припаивали стальной токовод. На рис. 6 показаны элементы полученного катода-мишени.

Ниже представлены результаты предварительных испытаний опытного образца катода-мишени на промышленной вакуумно-дуговой испарительной установке ВП-02М при следующих технологических режимах: отрицательное напряжение смещения – 150 В, ток разряда – 75А, время работы дугового испарителя – 10 мин в среде остаточного газа. В качестве подложки использовали листовую полированную нержавеющую сталь аустенитного класса. Для полученных покрытий характерно наличие капель, что является отличительной чертой вакуумных электродуговых покрытий. Внешний вид полученного покрытия в оптическом диапазоне показан на рис. 7, *a*, *б*.



a



б

Рис. 6. Основные элементы (*a*) и готовый образец (*б*) катода-мишени, полученный литейно-деформационным методом

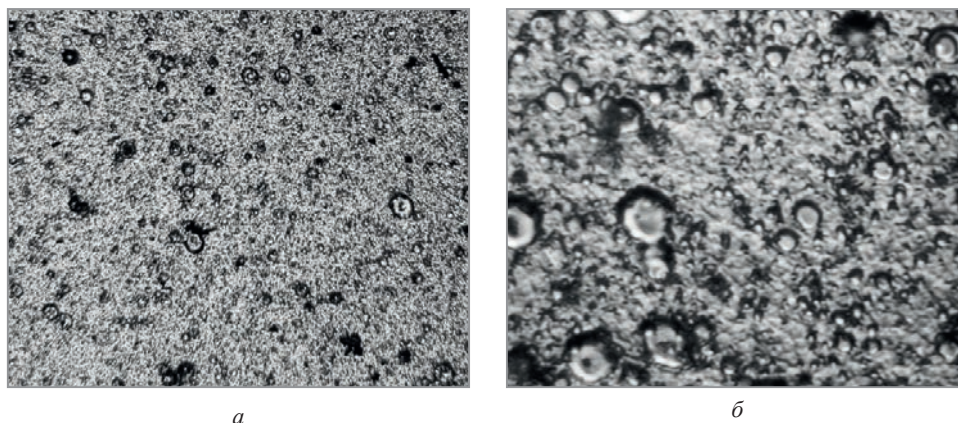


Рис. 7. Внешний вид покрытия с использованием литого катода из комплексного силицида:
a – $\times 100$; *б* – $\times 500$

Электронные фотографии аналогичных образцов представлены на рис. 8. Они свидетельствуют о том, что в покрытии присутствуют капли размерами от 0,5 до 50 мкм в плоскости изображения. Это можно оценить как шероховатость поверхности $R_z = 3,2-12,5$, что соответствует ее чистоте после шлифовки.

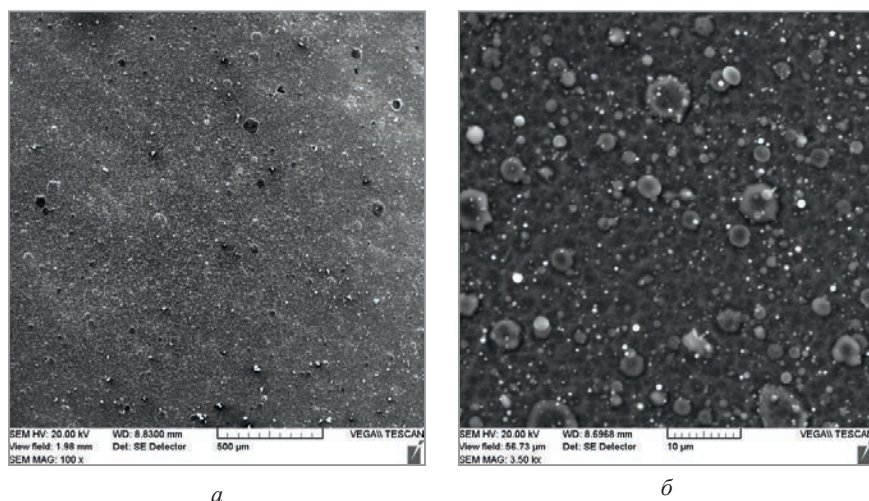


Рис. 8. Электронное изображение покрытия: *a* – $\times 100$; *б* – $\times 500$

Покрытие испытывали на жаростойкость в окислительном газовом пламени при температурах, достигающих 800 °С в течение 20 мин. Полученные результаты приведены на рис. 9. Из рисунка видно, что характер покрытия существенно не изменился в температурных зонах от 250 до 800 °С, при этом следов окисления не обнаружено.

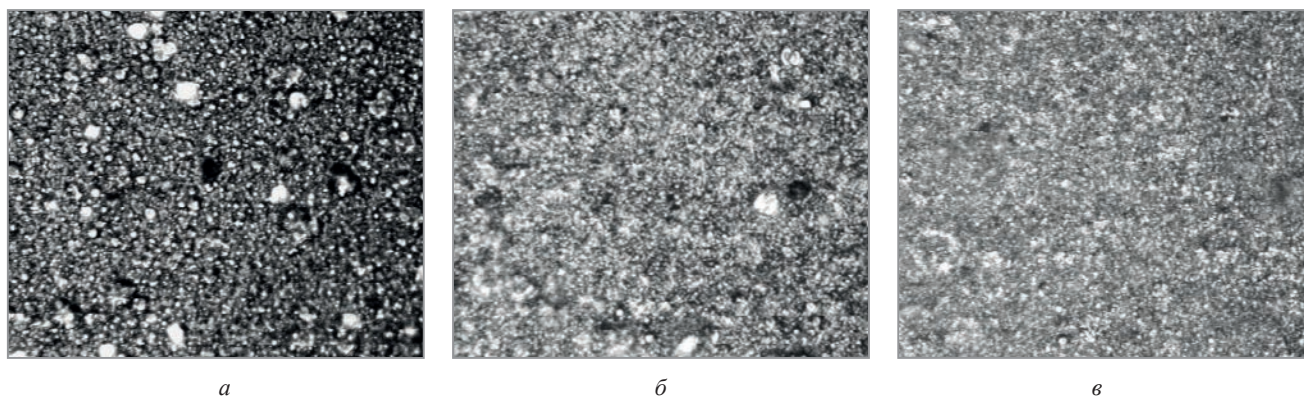


Рис. 9. Общий вид поверхностей покрытия из комплексного силицида после испытаний на жаростойкость при различных температурах:
a – 250 °С; *б* – 600; *в* – 800 °С

Выводы

1. Индукционная плавка с использованием чистых металлических материалов в атмосфере аргона на основе разработанной методики позволяет получать слитки комплексного силицида на основе титана с никелем с концентрацией элементов, близкой к расчетной, 19,94 % Si, 29,56 % Ni и 50,48 % Ti и плотностью не менее 93 %.
2. Предложенная схема прессования катодов-мишеней, где в качестве пластификатора использовали поливиниловый спирт, предполагает контроль фракций порошка по размерам и процентному соотношению между фракциями при усилении прессования не менее 50 т.
3. Показано, что катоды разработанного состава можно использовать для получения покрытий, характеризующихся высокой жаростойкостью на воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Филонов И. П., Мрочек Ж. А., Иванов И. А.** Перспективы применения вакуумно-плазменных технологий в машиностроении и инструментальном производстве // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1999. № 1. С. 32–40.
2. Плазменно-вакуумные покрытия / Под общ. ред. Ж. А. Мрочека. Минск: УП «Технопринт», 2004. 369 с.
3. **Иванов И. А., Слуцкий А. Г., Шейнерт В. А.** Анализ составов и методов получения катодов-мишеней из кремнийсодержащих сплавов // *Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. В 2-х ч.* Минск: БНТУ, 2015. Вып. 36. Ч. 1. С. 190–197.
4. **Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Иванов И. А.** Эрозия сплавов кремния с переходными металлами 4-й группы в стационарной вакуумной дуге // *Электронная обработка материалов.* 1991. № 5. С. 21–24.
5. **Поболь И. Н., Иванов И. А.** Новые методы изготовления катодов-мишеней для получения многокомпонентных покрытий // *Современные материалы, оборудование и технология упрочнения и восстановления изделий.* Новополоцк, 1993. С. 67.
6. **Иванов, И. А. и др.** Технологические варианты получения катодов-мишеней из силицидов металлов для вакуумных ионно-плазменных источников // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2018. Вып. 39. С. 84–90.
7. **Иванов, И. А. и др.** Исследование процесса получения сплавов металл-кремний для изготовления катодов-мишеней // *Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов».* Минск 14–16 сентября 2016 г. Минск: ФТИ НАН Беларуси. 2016.
8. **Иванов, И. А.** Особенности получения силицидов для изготовления катодов-мишеней / И. А. Иванов, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, Э. В. Ковалевич, И. Л. Кулинич // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2016. Вып. 37. С. 98–103.
9. **Иванов, И. А. и др.** Технологические особенности получения силицидов на основе меди, никеля и титана для катодов-мишеней // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2017. Вып. 38. С. 84–90.
10. **Иванов, И. А.** Получение катодов-мишеней из силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников / И. А. Иванов А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнер, Э. В. Ковалевич, В. Н. Хлебцевич // *Литье и металлургия.* 2018. № 2 (91). С. 99–102.
11. **Иванов, И. А. и др.** Особенности получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников литейно-деформационным методом // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2019. Вып. 40. С. 90–95.
12. **Иванов, И. А. и др.** Совершенствование процесса получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 2. С. 7–14.

REFERENCES

1. **Filonov I. P., Mrochek Zh. A., Ivanov I. A.** Perspektivy primeneniya vakuumno-plazmennyyh tehnologij v mashinostroenii i instrumental'nom proizvodstve [Prospects for the application of vacuum-plasma technologies in mechanical engineering and tool production]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-techn. navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical series*, 1999, no. 1, pp. 32–40.
2. *Plazmenno-vakuumnye pokrytija* [Plasma-vacuum coatings]. Minsk, UP Tehnoprnt Publ., 2004, 369 p.
3. **Ivanov I. A., Sluckij A. G., Shejnert V. A.** Analiz sostavov i metodov poluchenija katodov-mishenej iz kremnij soderzhashhih splavov [Analysis of compositions and methods of producing target cathodes from silicon-containing alloys]. *Metallurgija: Respublikanskij mezhdomestvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2015, vyp. 36, vol. 1, pp. 190–197.
4. **Mrochek Zh. A., Jezner B. A., Ivanov I. A.** Jerozija splavov kremnija s perehodnymi metallami 4-j grupy v stacionarnoj vakuumnoj duge [Erosion of silicon alloys with transition metals of the 4th group in a stationary vacuum arc]. *Jelektronnaja obrabotka materialov = Electronic material processing*, 1991, no. 5, pp. 21–24.
5. **Pobol' I. N., Ivanov I. A.** Novye metody izgotovlenija katodov- mishenej dlja poluchenija mnogokomponentnyh pokrytij [New methods of manufacturing target cathodes for obtaining multicomponent coatings]. *Sovremennye materialy, oborudovanie i tehnologija uprochnenija i vosstanovlenija izdelij = Modern materials, equipment and technology for strengthening and restoring products*, Novopolock, 1993, 67 p.
6. **Ivanov I. A. et al.** Tehnologicheskie varianty poluchenija katodov-mishenej iz silicidov metallov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov [Technological options for producing target cathodes from metal silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdomestvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2018, vyp. 39, pp. 84–90.
7. **Ivanov I. A., Sluckij A. G., Kovalevich Je. V., Shejnert V. A., Kulnich I. L.** Issledovanie processa poluchenija splavov metall-kremnij dlja izgotovlenija katodov-mishenej [Investigation of the process of obtaining metal-silicon alloys for the manufacture of target cathodes]. *Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki ma-*

terialov», 14–16 sentjabrja 2016 g., Minsk [Materials of the XI International Scientific and Technical Conference “Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials”. September 14–16, 2016, Minsk]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2016.

8. **Ivanov I.A., Sluckij A.G., Shejnert V.A., Kovalevich Je. V., Kulinich I.L.** Osobennosti poluchenija silicidov dlja izgotovlenija katodov-mishenej [Features of obtaining silicides for the manufacture of target cathodes]. *Metallurgija: Respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2016, vyp. 37, pp. 98–103.

9. **Ivanov I.A. et al.** Tehnologicheskie osobennosti poluchenija silicidov na osnove medi, nikelja i titana dlja katodov-mishenej [Technological features of obtaining silicides based on copper, nickel and titanium for target cathodes]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2017, vyp. 38, pp. 84–90.

10. **Ivanov I.A., Sluckij A.G., Shejnert V.A., Kovalevich Je. V., Hlebceвич V.N.** Poluchenie katodov-mishenej iz silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov [Obtaining target cathodes from silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 2(91), pp. 99–102.

11. **Ivanov I.A. et al.** Osobennosti poluchenija katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov litejno-deformacionnym metodom [Features of obtaining target cathodes from complex silicides for vacuum ion-plasma sources by the 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.

12. **Ivanov I.A. et al.** Sovershenstvovanie processa poluchenija katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyh istochnikov [Improvement of the process of obtaining target cathodes from complex silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Metallurgija: Respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, BNTU Publ., 2020, vyp. 41, vol. 2, pp. 7–14.