ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 533.9.07 PACS: 52.75.Hn

Исследование плазмотрона переменного тока для получения высокодисперсных порошков тугоплавких металлов

В. Е. Кузнецов, Ю. Д. Дудник, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева

Рассмотрены конструкции плазмотрона переменного тока и созданной на его базе плазмохимической установки по получению высокодисперсных порошков тугоплавких металлов, представлены экспериментальные исследования основных рабочих параметров и характеристик плазмотрона.

Ключевые слова: плазмотрон переменного тока, высокодисперсные порошки, водород, карбиды, плазмохимический синтез.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-72-77

Введение

Преимуществом плазменных технологий является высокая скорость нагрева плазмообразующего газа и обрабатываемого материала, а также возможность достижения высоких значений энтальпии дуговой плазмы [1, 2], что позволяет эффективно использовать их в ряде технических отраслей. Например, таких как получение новых материалов или улучшение физико-химических характеристик существующих материалов. Однако внедрение ультрадисперсных материалов в различные отрасли отечественной промышленности ограничивается высокой стоимостью, недостаточной производительностью и сложностью технологического оборудования. Поэтому разработка новых методов получения ультрадисперсных порошков является актуальной задачей и плазмохимическая технология способна предложить ее эффективное решение.

Потребность в карбидах вольфрама для мировой промышленности неуклонно увеличивается, а для промышленности нашей страны это может иметь стратегическое значение, так как потребность в этом материале всегда была очень высока, а производственные мощности недостаточны. Традиционные методы получения карбидов вольфрама сопровождаются подготовкой сырья, это влечет за собой значительный сброс химически активных реагентов, необходимых для разложения и преобразования химических соединений минералов [3]. Перспективным направлением для исследований является метод плазмохимического синтеза соединений [4].

Отличительной чертой плазмохимического метода является перевод исходного сырья в газообразное состояние и протекание химических реакций в течение времени порядка 10^{-1}–10^{-3} с. С очень большой скоростью в этих процессах происходит охлаждение зародышей кристаллизации и поэтому не происходит значительного их роста [5].

При внесении обрабатываемого материала в плазменный поток можно выделить основные физико-химические процессы: смешение с плазменным потоком; испарение в плазменном потоке; химическое реагирование в газовой фазе; объемное образование конден-

Кузнецов Владимир Евгеньевич, зав. лаб., в.н.с.
Дудник Юлия Дмитриевна, н.с.
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru
Сафронов Алексей Анатольевич, и.о. зав. отд.
Ширяев Василий Николаевич, с.н.с.
Васильева Ольга Борисовна, н.с.
ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб. 18.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2022 г.

© Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. Б., 2022

сированной фазы и рост частиц; релаксационные процессы и фазовые превращения в конденсированных частицах; хемосорбционные процессы на поверхности сформировавшихся частиц газовой фазы [6].

Использование в плазмотроне различных плазмообразующих газов и их смесей существенно расширяет потенциальные возможности плазмохимической установки. При добавлении в плазмообразующий газ (аргон) водорода или метана возможно увеличение эффективной мощности плазмотрона в несколько раз. Это может быть существенно для сокращения времени обработки и уменьшения дисперсии размеров частиц получаемого материала. Данная особенность конструкции плазмотрона переменного тока может быть использована при получении тугоплавких материалов на основе вольфрама и при синтезе его соединений. Следует отметить, что смешивание различных газов в плазмотроне переменного тока, рассматриваемого в данной работе, возможно без его остановки и переналадки, что позволяет проводить широкий круг экспериментов без дополнительных затрат времени и ресурсов.

В данной статье, рассматривается исследование конструкции плазмотрона переменного тока, основных рабочих параметров, их зависимостей и взаимовлияния. В ходе работы ставилась задача разработать конструкцию установки плазмохимического синтеза на базе плазмотронов переменного тока, определить рабочие параметры процессов и провести эксперименты по получению ультрадисперсного карбида вольфрама. Из [7, 8] можно увидеть, что для успешного получения высокодисперсных материалов в лабораторной установке мощность плазмотрона переменного тока должна составлять величину до 5 кВт при среднемассовой температуре плазменной струи в пределах от 1200 К до 2500 К и расходе рабочего газа ~1 г/с.

Возможность созданного плазмотрона к изменению состава и использованию смеси различных плазмообразующих газов непосредственно в процессе эксперимента, позволит поддерживать оптимальные условия и температурные режимы в зоне реакции для получения ультрадисперсных частиц.

Описание плазмотрона и установки по плазмохимическому синтезу

В ИЭЭ РАН разработан ряд высоковольтных электродуговых плазмотронов переменного тока со стержневыми электродами [9, 10], которые могут применяться для решения технологических задач, не требующих значительного расхода рабочего газа и большой мощности. Экспериментальные установки созданы на базе плазмотрона переменного тока со стержневыми конусообразными электродами, его 3D-модель представлена на рис. 1.

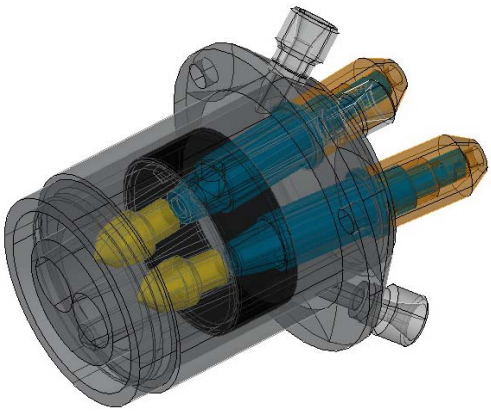

Рис. 1. Плазмотрон переменного тока со стрежневыми электродами

В корпусе плазмотрона расположены два канала, в которых установлены стержневые электроды, выполненные из меди, имеющие съемные вольфрамовые наконечники. В корпус с помощью штуцеров подается охлаждающая жидкость, препятствующая его перегреву в процессе работы. Одна из особенностей данной конструкции – это цилиндрические разрядные каналы, сходящиеся под углом к сопловой части плазмотрона. Газовые вводы организованы в разрядных каналах в области электродов (приэлектродная зона) тангенциально в каждый канал, обеспечивая осевую стабилизацию разряда.

Зажигание дуг при запуске плазмотрона происходит между электродами при приложении напряжения 6 кВт за счет самостоятельного пробоя зазоров между электродами и рядом расположенными с ними стенками разрядных каналов. Образованные дуговые столбы под действием потоков плазмообразующих сред вытягиваются вдоль осей раз-

рядных каналов и замыкаются между собой на выходе плазмотрона, и дуга начинает гореть от торца одного электрода до торца другого. Если дуга гаснет, то процесс повторяется.

Плазмотрон такого типа способен генерировать плазменную струю с высокой энтальпией и градиентом температуры, также он работает как на инертных, так и на окислительных газах в диапазоне мощности до 5 кВт и расходом плазмообразующего газа от 0,005 до 1 г/с.

Важной особенностью разработанной конструкции является возможность устойчивой работы плазмотрона в крайне широком диапазоне расходов.

Общий вид экспериментальной плазмохимической установки для получения карбидных порошковых материалов приведен на рис. 2.

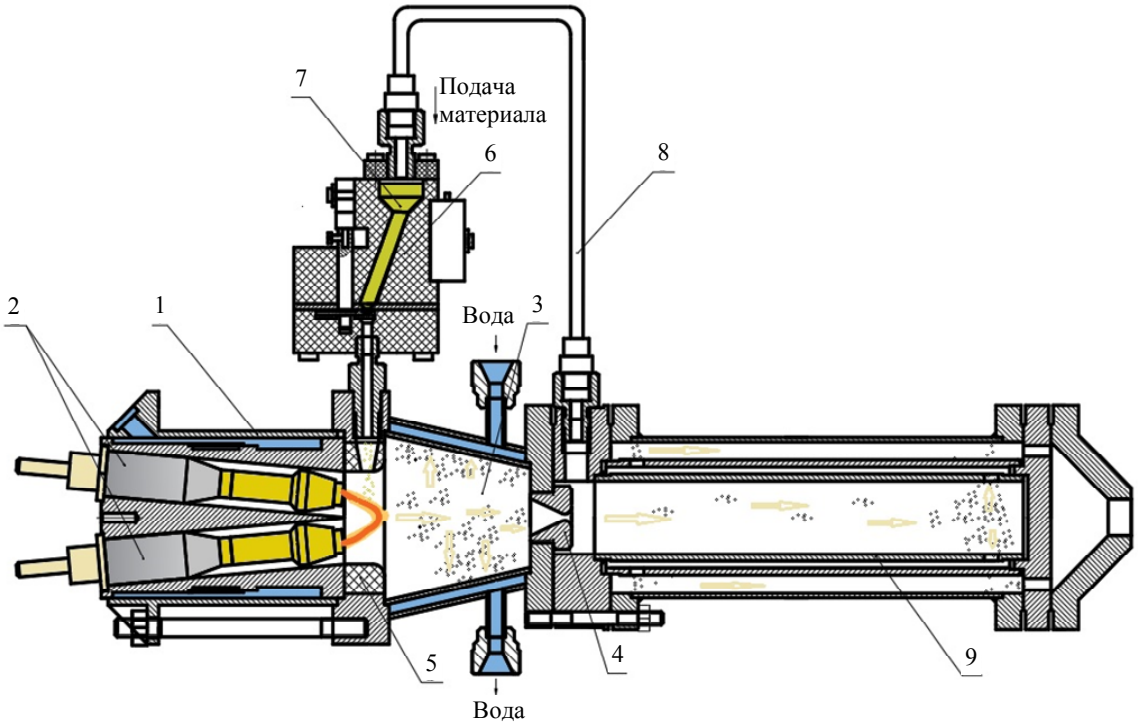

Рис. 2. Плазмохимическая установка для получения карбидных материалов: 1 – плазмотрон переменного тока; 2 – электроды со сменными наконечниками; 3 – реакционная камера; 4 – сменное сопло; 5 – футеровочное кольцо из графита; 6 – питатель; 7 – бункер для продукта; 8 – трубка; 9 – система улавливания продукта

В установке используется плазмотрон переменного тока мощностью до 5 кВт [9], он присоединен к реакционной водоохлаждаемой камере, футерованной кольцом из графита с выходным сменным сопловым наконечником. На фланце реакционной камеры через переходной штуцер установлен питатель для подачи материала (оксид вольфрама). Питатель включает в себя корпус, бункер для продукта, выравнивающую давление среды магистраль, два двигателя, один из которых приводит во вращение вал с диском питающего устройства, а второй обеспечивает привод вибратора для предотвращения слипания порошка в устройстве. Через сменные сопла плазмохимическая установка соединяется с системой улавливания готового продукта.

Материал, вводимый в плазменный поток, помимо нагрева до высокой температуры испытывает воздействие таких факторов, как поток плазмообразующего газа, электромагнитных и звуковых волн, а также альвеновских волн, идущих вдоль силовых линий плазменного потока. Это приводит как к упорядоченному, так и хаотическому движению реагирующих частиц, ведет к изменению траектории их движения, заставляя их взаимодействовать друг с другом, с изменением их массы, структуры и др. Высокая температура плазменной струи способствует разложению, ионизации и ускорению процесса химического синтеза.

В качестве плазмообразующего газа первоначально планировалась использование смеси аргона и метана CH_4 или пропана C_3H_8,

но использование смеси аргона и водорода, с последующим отключением подачи аргона представляется более выгодным с точки зрения энергетических характеристик плазменной струи. В качестве прекурсора использован порошок оксида вольфрама с расходом 0,5–1,5 г/с. Продуктом реакции является порошок в виде мелкодисперсных частиц, которые собираются как в уловителе продукта, так и на на стенках реакционной камеры.

Результаты и обсуждения

В процессе проведения экспериментов определялись и отрабатывались элементы конструкции плазмохимической установки и рабочие режимы плазмотрона по общему расходу смеси плазмообразующих газов и ее отдельных компонент.

Благодаря возможности изменять положение электрода в электродуговой камере были проведены эксперименты в диапазоне мощности плазмотрона от 0,7 кВт до 2 кВт (зависит от состава плазмообразующего газа). Расход аргона составил ~0,4 г/с, расход водорода ~0,006 г/с.

Из-за высокой теплоемкости водорода и ограничения по величине рабочего тока (мощности) источника питания, имеющегося в наличии, максимально стабильная работа плазмотрона достигалась при расположении рабочей поверхности торцевого электрода на уровне выходного среза каналов.

На рисунке 3 и 4 представлены осциллограммы токов и напряжений для плазмотрона переменного тока, при работе с вынесенными электродами и утопленными электродами, где в качестве плазмообразующего газа использовался водород.

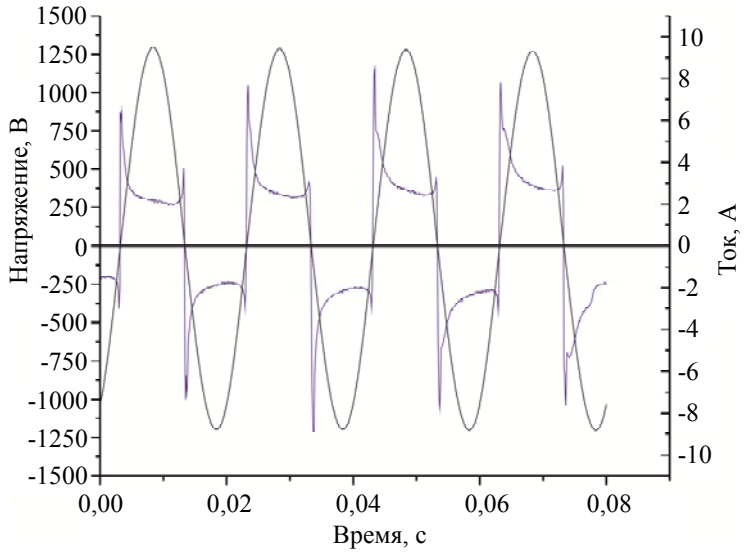

Рис. 3. Осциллограмма токов и напряжений при подаче в плазмотрон чистого водорода с расходом 0,006 г/с при вынесенных электродах

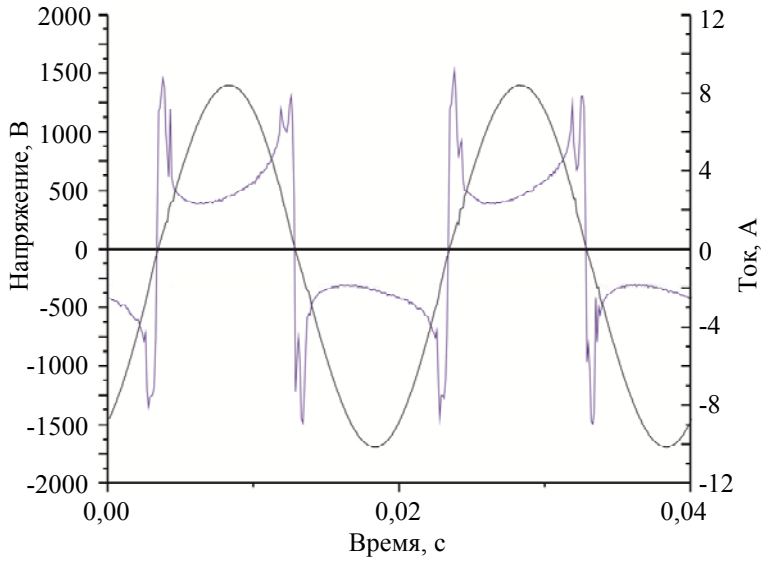

Рис. 4. Осциллограмма токов и напряжений при подаче в плазмотрон чистого водорода с расходом 0,006 г/с при утопленных электродах

Из осциллограмм видно, что на характер зажигания дуги влияет не только форма и материал электрода, но и их взаимное расположение относительно каналов плазмотрона. В случае утопленных электродов, расположенных вровень с каналом плазмотрона, пиковые значения напряжения зажигания дуги составляли порядка 1400 В, что почти в два раза превышает значения для варианта вынесенных электродов.

При использовании водорода в качестве плазмообразующего газа, запуск плазмотрона выполнялся на аргоне, и в начале подачи водорода наблюдается наибольшая неустойчивость горения дуги, после отключения подачи аргона рабочие параметры плазмотрона стабилизируются с существенным ростом величины падения напряжения на дуге и соответственно значения мощности дуги, что наглядно видно по рабочим осциллограммам. При этом основным ограничивающим фактором является мощность (величина рабочего тока) высоковольтного трансформатора, через который осуществляется питание плазмотрона.

Заключение

В ходе работ модернизирован и подготовлен для работы с газовыми смесями плазмотрон переменного тока мощностью ~5 кВт, опробована конструкция плазмохимического реактора на базе этого плазмотрона, отработаны их основные узлы и определены некоторые рабочие характеристики.

По итогам экспериментальных исследований выявлено, что добавление углеводородной компоненты или водорода в плазмообразующий газ заметно изменяет условия горения дуги. Это проявляется как в повышении общего уровня напряжения на дуге, так и в изменении характера горения дуги. Эти эффекты проявляются практически сразу, даже при незначительном (менее 1 об. %) содержании углеводородной компоненты или водорода в плазмообразующей смеси.

На плазмохимической установке по получению карбидных материалов выполнены эксперименты по определению соотношений смеси аргона и метана CH_4 для обеспечения устойчивой работы плазмотрона достаточной для получения карбида вольфрама.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Safronov A. A., Vasileva O. B., Dudnik Yu. D., Kuznetsov V. E., Shiryaev V. N., Subbotin D. I., Pavlov A. V.* / Proc. 14th High-Tech Plasma Processes (HTTP14). 2016. P. 81.

2. *Safronov A. A., Vasileva O. B., Dudnik Yu. D., Kuznetsov V. E., Shiryaev V. N.* / Proc. Int. Conf. "Sovremennyye problemy teplofiziki i energetiki". Moscow. in 2 Vol. 2017. P. 251–252.

3. *Кушхов Х. Б., Карданов А. Л., Адамокова М. Н.* // Расплавы. 2012. № 4. С. 65.

4. *Балахонов Д. И., Макаров И. А.* // Расплавы. 2020. № 2. С. 113.

5. *Калинин В. Т., Дудников А. С., Качан А. Я., Калинина Н. Е.* // Вестник двигателестроения. 2007. № 1. С. 166.

6. *Калинин В. Т.* Системные технологии. – Д.: НМетАУ. 2001.

7. *Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н., Васильева О. Б.* // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 66.

8. *Dudnik Y. D., Safronov A. A., Kuznetsov V. E., Shiryaev V. N., Vasilieva O. B., Subbotin D. I., Popkov V. I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. P. 012127.

9. *Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н.* // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58.

10. *Сафронов А. А., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Кузнецов В. Е., Ширяев В. Н.* // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 6. С. 926.

PACS: 52.75.Hn

Investigation of an alternating current plasma torch for obtaining highly dispersed powders of refractory metals

V. E. Kuznetsov, Yu. D. Dudnik, A. A. Safronov, V. N. Shiryaev, and O. B. Vasilieva

Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences
18 Dvortsovaya nab., St. Petersburg, 191186, Russia
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Received March 17, 2022

The paper deals with the design of an AC plasma torch, created on its basis a plasma-chemical installation for the production of fine powders of refractory metals. The paper presents experimental studies of the main operating parameters and characteristics of the plasma torch.

Keywords: AC plasma torch, fine powders, hydrogen, carbides, plasma-chemical synthesis.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-72-77

REFERENCES

1. A. A. Safronov, O. B. Vasileva, Yu. D. Dudnik, V. E. Kuznetsov, V. N. Shiryaev, D. I. Subbotin, and A. V. Pavlov, in *Proc. 14th High-Tech Plasma Processes* (HTTP14). 2016. P. 81.
2. A. A. Safronov, O. B. Vasileva, Yu. D. Dudnik, V. E. Kuznetsov, and V. N. Shiryaev, in *Proc. Int. Conf. "Sovremennyye problemy teplofiziki i energetiki"* (Moscow, in 2), vol. 2017. P. 251–252.
3. H. B. Kushkhov, A. L. Kardanov, and M. N. Adamokova, Rasplavi, No. 4, 65 (2012).
4. D. I. Balakhonov and I. A. Makarov, Rasplavi, No. 2, 113 (2020).
5. V. T. Kalinin, A. S. Dudnikov, A. Ya. Kachan, and N. E. Kalinina, Vestnik dvigatelestroeniya, No. 1, 166 (2007).
6. V. T. Kalinin, *Sistemnie technologii* (NMetAU, D., 2001).
7. A. A. Safronov, V. E. Kuznetsov, Yu. D. Dudnik, V. N. Shiryaev, and O. B. Vasileva, Applied Physics, No. 3, 66 (2021) [in Russian].
8. Y. D. Dudnik, A. A. Safronov, V. E. Kuznetsov, V. N. Shiryaev, O. B. Vasilieva, D. I. Subbotin, and V. I. Popkov, J. Phys.: Conf. Ser., 012127 (2019).
9. A. A. Safronov, V. E. Kuznetsov, O. B. Vasileva, Yu. D. Dudnik, and V. N. Shiryaev, Pribory i tekhnika eksperimenta, No. 2, 58 (2019).
10. A. A. Safronov, O. B. Vasileva, Yu. D. Dudnik, V. E. Kuznetsov, and V. N. Shiryaev, Teplofizika vysokikh temperatur **56** (6), 926 (2018).