

УДК 539.231:535.016  
EDN: JZXVMG

PACS: 81.15.Cd

## Исследование влияния малой добавки пропан-бутана на электроды генератора низкотемпературной плазмы аргона

М. Х. Гаджиев, Д. И. Юсупов, М. В. Ильичев, А. С. Тюфтяев

*Проведено исследование состояния катода со вставкой из чистого и лантанированного вольфрама при добавлении к плазмообразующему газу аргону пропан-бутана для генератора низкотемпературной плазмы постоянного тока с вихревой стабилизацией дуги и расширяющимся каналом газоразрядного тракта. При малой добавке пропана (1 %) в аргоновой среде, происходит осаждение углерода на границе раздела между вольфрамом и корпусом катода из меди со скоростью  $\sim 0,2$  мм/мин. На аноде осаждение при данном расходе не обнаружено.*

*Ключевые слова:* генератор низкотемпературной плазмы; плазмотрон; электрод; аргон; пропан-бутан.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-29-34

### Введение

Поток низкотемпературной плазмы, генерируемый различными генераторами, активно применяются не только для решения научных проблем, но и в промышленности, производстве и технике: плазмохимия, плазменная металлургия, обработка материалов, напыление, получение мелкодисперсных порошков, теплоэнергетика, медицина и т. д. [1–10]. Часто в науке и технике необходим непрерывный поток химически неактивной плазмы аргона, создаваемого высокоресурсным плазмотроном, с температурой от тысяч

до десятков тысяч градусов. Из всего многообразия генераторов низкотемпературной плазмы (ГНП), наибольшую температуру плазмы могут создать плазмотроны постоянного тока ( $T < 25$  кК) [11–16]. Сдерживающим фактором широкого распространения дуговых ГНП постоянного тока в технологиях непрерывной работы является ресурс электродов. Анализ имеющихся ГНП, работающих на мощностях от нескольких кВт до десятков МВт, показывает, что наибольший ресурс и устойчивый режим работы имеют плазмотроны, работающие при использовании инертных газов, особенно аргона [11–15].

Ресурс ГНП в основном для плазмотронов косвенного действия связан с эрозией электрода-катода, при этом износ сопла-анода происходит медленнее. Износ электрода-катода ГНП происходит под действием сложных тепловых, электрических, химических процессов на поверхности и внутри катода и в приэлектродной области.

В технологических процессах, где важно качество плазмы и нельзя применять расходимые электроды, для увеличения ресурса катода применяются на сегодняшний день различные методы: использование оптимального режима работы, теплового состояния для ма-

---

Гаджиев Махач Хайрудинович, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail makhach@mail.ru

Юсупов Дамир Ильдусович, с.н.с., к.т.н.

E-mail yusupovdi@ihed.ras.ru

Ильичев Максим Валерьевич, н.с., к.т.н.

E-mail imvpl@mail.ru

Тюфтяев Александр Семенович, гл.н.с., д.т.н.

E-mail astpl@mail.ru

Объединенный институт высоких температур РАН.  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

---

Статья поступила в редакцию 10.07.2024

Принята к публикации 18.11.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

---

© Гаджиев М. Х., Юсупов Д. И., Ильичев М. В.,  
Тюфтяев А. С., 2024

териала вставки катода; увеличение термоэмиссионных свойств вставки катода; изменение характера привязки к поверхности электродов столба дуги (диффузная или контрагированная); электромагнитными и газодинамическими способами передвижение пятна дуги по поверхности электродов; расщепление столба дуги; применение различных многоэлектродных схем; путем стягивания одиночных маломощных локальных дуг многоэлектродного ГНП создание общего дугового столба; разработка многопозиционных катодных узлов; использование схем каскадного усиления; жидкого металла в качестве электродов; переход на высокие значения напряжения горения дуги и понижение тока и т. д.

Одним из способов увеличения ресурса плазмотронов постоянного тока без усложнения конструкции ГНП является использование расширяющегося канала газоразрядного тракта [16]. В аргоновой среде оптимальным углом раскрытия газоразрядного тракта по направлению потока между образующей и осью канала является  $6^\circ$ , которая приводит к возрастающей вольт-амперной характеристике (ВАХ) по сравнению с цилиндрическим каналом постоянного сечения и повышению устойчивости горения дуги в широком диапазоне изменения тока и расхода [16]. Падающая ВАХ характерна для большинства плазмотронов с продольным потоком плазмообразующего газа и самоустанавливающейся длиной дуги. В цилиндрическом канале без изменения расхода плазмообразующего аргона увеличение силы тока приводит к уменьшению длины дуги, соответственно и к уменьшению напряжения горения дуги, мощность дуги увеличивается медленнее, чем сила тока. Так как ресурс электродов и стабильность работы ГНП постоянного тока во многом связан от силы тока дуги, в плазмотронах с цилиндрическим каналом для получения слабо возрастающей ВАХ и стабилизации дуги, термоизоляции ее от стенок канала создаются различные диафрагмы, полости, межэлектродные вставки, уступы, применяется закрутка газа, аксиальные потоки, пористый вдув, что усложняет общую конструкцию ГНП и предъявляет жесткие требования к источнику электрического питания и газоснабжения. Кроме этого, каждая схема электрического питания и газоснабжения имеет преимущество только в

определенном диапазоне параметров силы тока и расхода плазмообразующего газа. Вышеуказанных недостатков цилиндрического канала ГНП лишен расширяющийся канал газоразрядного тракта, приводящий к растущей ВАХ, стабильности работы плазмотрона в более широком диапазоне изменения силы тока и расхода газа.

Простым, надежным и экономичным методом увеличения ресурса катода может быть малая добавка недорогого и распространенного пропан-бутана в плазмообразующий газ. Использование такого плазмообразующего газа приведет к образованию около поверхности катода и на внутренней поверхности анода среды из углеродосодержащего газа, откуда ионы углерода под действием приэлектродного падения потенциала будут осаждаться на поверхности электродов.

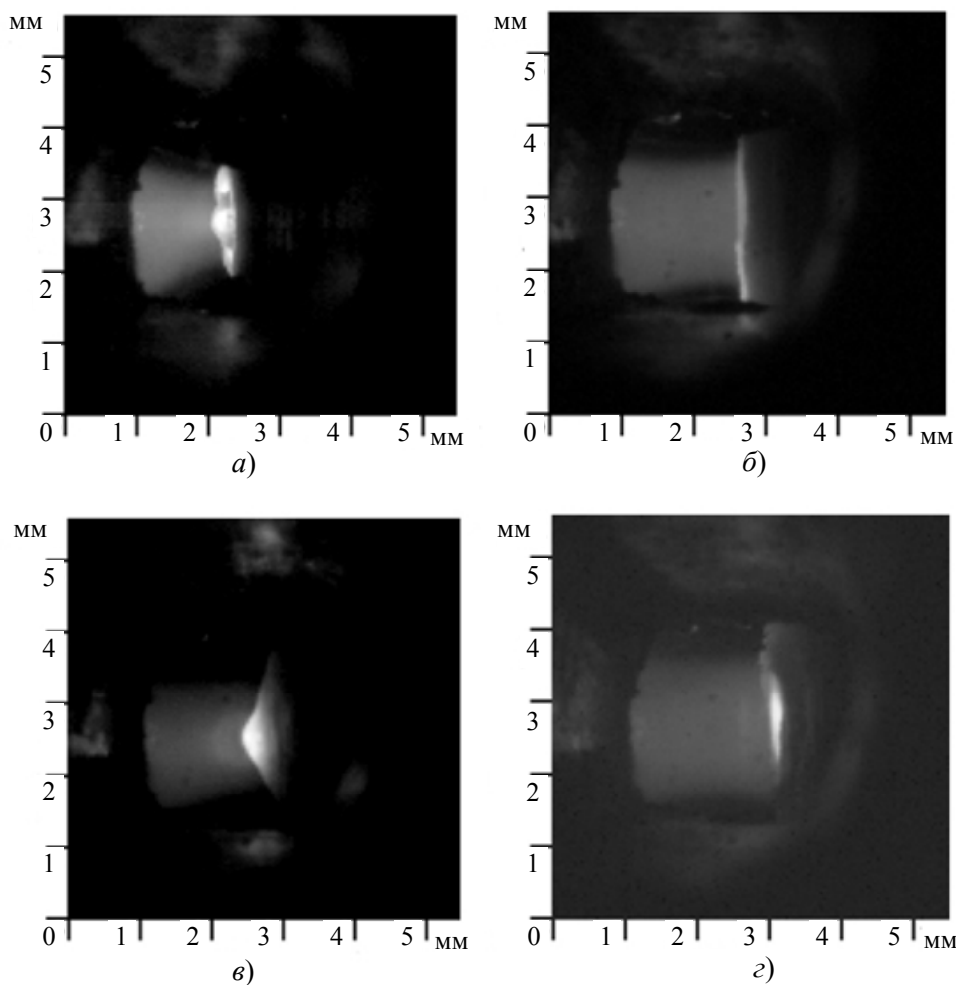
Поэтому целью работы было исследование влияния малой добавки пропан-бутана совместно с плазмообразующим аргоном на ресурс электродов, особенно катода со вставкой из лантанированного (наиболее часто используемый в инертных газах) и чистого вольфрама.

## Эксперимент

При выполнении исследований влияния пропан-бутана совместно с аргоном на ресурс электродов ГНП использовался экспериментальный плазмотрон с расширяющимся каналом газоразрядного тракта и вихревой стабилизацией, состоящий из катодного узла, промежуточного сопла и анода [17]. Для наблюдения за поверхностью катода изолированное промежуточное сопло спроектировано со смотровыми кварцевыми окнами. Так же промежуточное сопло участвует в поджиге плазмотрона: между катодом и соплом подается высокочастотный импульс высокого напряжения, зажигающий дежурную дугу между катодом и соплом, которая впоследствии выдувается потоком газа на анод и переход в основную дугу. Использование такой конструкции плазмотрона с промежуточным изолированным соплом в отличие от классической двухузловой схемы (катодный и анодный узел) задавая размеры сопла, позволяет также растягивать длину дуги, т. е. увеличивать

напряжение горения дуги при заданном расходе газа и токе. Первое окно сопла используется для наблюдения вершины катода с помощью фокусирующего объектива чернобелой высокоскоростной камеры Phantom Miro M110, а второе противоположное окно используется для спектральных измерений трехканальным спектрометром Avaspec 2048. Подача пропан-бутана в разрядный промежуток ГНП производится совместно с плазмообразующим аргоном.

Экспериментальное исследование влияния добавки пропан-бутана к плазмообразующему аргону на ресурс электродов проводилось с использованием медных катодов с вставками из лантанированного ( $W-2\% La_2O_3$ ) (рис. 1а–б) и чистого вольфрама (рис. 1в–г) при расходе плазмообразующего аргона 1,5 г/с и токе дуги 200 А. Разряд зажигался в чистом аргоне, через некоторое время в аргон добавлялся до 1 % пропан-бутана, не изменяя суммарный расход плазмообразующей смеси.



**Рис. 1. Фото вершины катода: а) – вставка из лантанированного вольфрама в момент добавления пропан-бутана; б) – вставка из лантанированного вольфрама через 3 мин после добавления пропан-бутана; в) – вставка из чистого вольфрама в момент добавления пропан-бутана; г) – вставка из чистого вольфрама через 4 мин после добавления пропан-бутана**

Оценка температуры и концентрации электронов проводится методом относительных интенсивностей линий частиц аргона разной кратности ионизации Ag II и Ag III и по штарковскому уширению спектральных линий Ag II 363,79 нм и Ag II 329,36 нм [15, 18]. Использование скоростной видеокамеры с ин-

терференционным фильтром (589 нм) позволяет оценить температуру на поверхности вставки катода [17]. С помощью эталонной вольфрамовой лампы с яркостной температурой в 2400 К производится калибровка яркости, при этом степень черноты поверхности вольфрама в твердой фазе принималось рав-

ной 0,48, в жидкой – 0,40 [19, 20]. Вблизи длин волн (320÷370 нм), используемых для определения температуры плазмы, отсутствуют излучающие линии материала катода, поэтому влиянием излучения от катодных элементов можно пренебречь.

### Результаты и их обсуждение

Скоростная видеосъемка показала, что независимо от типа катода в момент зажигания дуги (первые 100 мс) интенсивный унос материала, который значительно уменьшается при переходе дуги в стационарный режим горения. При стационарном горении дуги 200 А чистый вольфрам находится в жидком состоянии, температура поверхности достигает 3,8 кК (температура плавления чистого вольфрама ~ 3,7 кК), температура и концентрация электронов в плазме положительного столба вблизи катода ~ 2,6 эВ и  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Вставка из лантанированного вольфрама находится в твердом состоянии с температурой поверхности ~ 3,1 кК (температура плавления лантанированного вольфрама ~ 4,5 кК), температура и концентрация плазмы составляет 2 эВ и  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

При добавлении даже 1 % пропан-бутана к плазмообразующему аргону приводит к возобновлению интенсивного уноса материала вставки, которая прекращается при достижении площади привязки катодного пятна определенного значения. Поведение вставок катодов при подаче пропан-бутана разное.

Сразу после подачи пропан-бутана на катоде из лантанированного вольфрама (рис. 1а–б) началось увеличение площади привязки катодного пятна и одновременно осаждение частиц по диаметру катодного пятна и границы водоохлаждаемого медного корпуса катода и вставки, при этом вставка из лантанированного вольфрама находится в твердом состоянии. После остановки увеличения площади привязки дуги происходит одновременно унос материала вставки с центра катодного пятна и осаждение материала на границе раздела между вставкой и корпусом катода из меди со скоростью ~ 0,2 мм/мин.

При подаче пропан-бутана чистый вольфрам находится в жидкой фазе, происходит увеличение катодного пятна и резкий унос

массы материала вставки (рис. 1в–г). В чистом вольфраме в отличие от лантанированного только после остановки роста катодного пятна начался прирост материала на границе раздела со скоростью ~ 0,2 мм/мин. Скоростная видеосъемка показала, что в некоторые моменты времени осажденный материал на поверхности электрода по диаметру катодного пятна частично разрушался и уносился вниз по потоку.

На рисунке 2 приведены фотографии катодов со вставкой из лантанированного вольфрама: после ресурсных испытаний до добавления пропан-бутана (слева) и через некоторое время после добавления пропан-бутана (справа). Осаждение материала происходит вдоль границы раздела вставки и меди в виде чашечки с углублением в середине (образуется своего рода «полюс катод»), где на основании и размещается опорное пятно дуги (рис. 1).



*Рис. 2. Фото катода: слева – после ресурсных испытаний до добавления пропан-бутана, справа – катод через 3 минуты после добавления пропан-бутана*

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ поверхности образца на кромке показал, что в обоих случаях на границе раздела между вставкой и корпусом катода из меди формировался углеродный слой без признаков окисления. При горении разряда в смеси аргона с пропан-бутаном наименьшей энергией ионизации обладает углерод ~ 11,3 эВ, поэтому концентрация ионов углерода у катода будет превышать равновесную. Во всех

экспериментах при добавке до 1 % пропан-бутана осаждение твердой фазы на аноде не обнаружено, поверхность анода покрыта равномерно небольшим темным слоем, имеющую аморфную структуру, что характерно для сажи. При увеличении расхода пропан-бутана происходит осаждение продуктов распада в виде расплава (твердой фазы) и сажи, состоящего в основном из углерода, и на аноде, приводящая с течением времени к изменению профиля сечения газоразрядного тракта и развитию пульсационных явлений, что сказывается на газодинамике и на возможности движения дуги по поверхности анода, связанных с большой скоростью осаждения продуктов распада на охлаждаемом аноде.

### Заключение

Таким образом, исследование влияния малой добавки к плазмообразующему газу аргону ~ 1 % пропан-бутана на состояние электродов ГНП постоянного тока с вихревой стабилизацией дуги и расширяющимся каналом газоразрядного тракта приводит «самовосстанавливающему» эффекту катодной вставки, наиболее изнашиваемого элемента ГНП при штатном режиме работы. На границе раздела между вольфрамом и корпусом катода из меди происходит осаждение углерода со скоростью 0,2 мм/мин, на аноде при данном расходе осаждение в виде расплава не обнаружено. Применение в ГНП расширяющегося канала газоразрядного тракта, лантанированной вставки в катод и добавки пропан-бутана до 1 % в плазмообразующий аргон позволит увеличить ресурс электродов, что будет иметь большое значение в плазменных технологиях, где необходима долгая и непрерывная работа в химически неактивной среде, а также работа в токсичных условиях.

*Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Изд. 3. – М., 2009.
2. Чердиченко В. С., Аньшаков А. С., Кузьмин М. Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: НТГУ, 2008.
3. Петров С. В., Карп И. Н. Плазменное газозапыление. – Киев: Наук. думка, 1993.
4. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977.
5. Лакомский В. И. Плазменно-дуговой переплав. – Киев: Техника, 1974.
6. Краснов А. Н., Шаривкер С. Ю., Зильберберг В. Г. Низкотемпературная плазма в металлургии. – М.: Металлургия, 1970.
7. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976.
8. Михатулин Д. С., Полежаев Ю. В., Ревизников Д. Л. Теплообмен, термохимическое и термоэрозийное разрушение тепловой защиты. – М.: Янус-К, 2011.
9. Sanlisoy A., Carpinlioglu M. O. / Int. J. Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. № 2. P. 1361.
10. Son E. E., Gadzhiev M. Kh., Kulikov Yu. M. / High Temperature. 2020. Vol. 58. № 4. P. 495.
11. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1975.
12. Глебов И. А., Рутберг Ф. Г. Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
13. Коротеев А. С., Миронов В. М., Свиричук Ю. С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993.
14. Жуков М. Ф., Засыпкин И. М., Тимошевский А. Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Низкотемпературная плазма. Т. 17. – Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999.
15. Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Низовский В. Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. Изд. 2, испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
16. Гаджиев М. Х., Куликов Ю. М., Сон Э. Е., Тюфтяев А. С., Саргсян М. А., Юсупов Д. И. / ТВТ. 2020. Т. 58. № 1. С. 15.
17. Горячев С. В., Исакаев Э. Х., Мясников М. И., Чиннов В. Ф. / ТВТ. 2008. Т. 46. № 6. С. 820.
18. Konjevic N., Lesage A., Fuhr J. R., Wiese W. L. / J. Phys. Chem. Ref. 2002. Vol. 31. № 3. P. 819.
19. Cagran C., Brunner C., Seifert A., Pottlacher G. / High Temperatures-High Pressures. 2002. Vol. 34. № 6. P. 669.
20. Cagran C., Pottlacher G., Rink M., Bauer W. / International Journal of Thermophysics. 2005. Vol. 26. P. 1001.

## Investigation of the effect on the electrodes of a small addition of propane-butane to the plasma-forming gas of the low-temperature argon plasma generator

*M. Kh. Gadzhiev, D. I. Yusupov, M. V. Ilyichev and A. S. Tyuftyaev*

Joint Institute for High Temperatures RAS  
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: makhach@mail.ru

*Received 10.07.2024; accepted 18.11.2024*

***The state of the cathode with an insert made of pure and lanthanide tungsten was studied when propane-butane was added to the argon plasma-forming gas for a low-temperature DC plasma generator with vortex arc stabilization and an expanding channel of the gas-discharge path. With a small addition of propane (1 %) in argon medium, carbon is deposited at the interface between tungsten and the copper cathode housing at a rate of ~0.2 mm/min. No deposition was found at the anode at this rate.***

**Keywords:** low temperature plasma generator; plasma torch; electrode; argon; propane-butane.

### REFERENCES

1. Rajzer Yu. P., Fizika gazovogo razryada. 3-e izd. (Physics of a gas discharge), Moscow, 2009 [in Russian].
2. Cherednichenko V. S., Anshakov A. S. and Kuzmin M. G., Plazmennye elektrotehnologicheskie ustanovki (Plasma electrotechnological installations), Novosibirsk, NTGU, 2008 [in Russian].
3. Petrov S. V. and Karp I. N., Plazmennoe gazovozdushnoe napylenie (Plasma gas-air spraying), Kiev, Nauk. dumka, 1993 [in Russian].
4. Kudinov V. V., Plazmennye pokrytiya (Plasma coatings), Moscow, Nauka, 1977 [in Russian].
5. Lakomskij V. I., Plazmenno-dugovoj pereplav (Plasma arc remelting), Kiev, Tekhnika, 1974 [in Russian].
6. Krasnov A. N., Sharivker S. Yu. and Zilberberg V. G., Nizkotemperaturnaya plazma v metallurgii (Low-temperature plasma in metallurgy), Moscow, Metallurgiya, 1970 [in Russian].
7. Polezhaev Yu. V. and Yurevich F. B., Teplovaya zashchita (Thermal protection), Moscow, Energiya, 1976 [in Russian].
8. Mihatulín D. S., Polezhaev Yu. V. and Reviznikov D. L., Teploobmen, termohimicheskoe i termoerozionnoe razrushenie teplovoj zashchity (Heat transfer, thermochemical and thermoerosive destruction of thermal protection), Moscow, Yanus-K, 2011 [in Russian].
9. Sanlisoy A. and Carpinlioglu M. O., Int. J. Hydrogen Energy **42** (2), 1361 (2017).
10. Son E. E., Gadzhiev M. Kh. and Kulikov Yu. M., High Temp. **58** (4), 495 (2020).
11. Zhukov M. F., Koroteev A. S. and Uryukov B. A., Prikladnaya dinamika termicheskoi plazmy (Applied Dynamics of Thermal Plasma), Novosibirsk, Nauka, 1975 [in Russian].
12. Glebov I. A. and Rutberg F. G., Moshchnye generatory plazmy (Powerful Plasma Generators), Moscow, Energoatomizdat, 1985 [in Russian].
13. Koroteev A. S., Mironov V. M. and Svirchuk Yu. S., Plazmotrony. Konstruktsii, kharakteristiki, raschet (Plasma Torches: Design, Characteristics, Calculations), Moscow, Mashinostroenie, 1993 [in Russian].
14. Zhukov M. F., Zasytkin I. M., Timoshevskiy A. N. et al., Elektrodugovye generatory termicheskoi plazmy. Nizkotemperaturnaya plazma (Electric Arc Generators of Thermal Plasma. Low-Temperature Plasma), vol. 17 of Nizkotemperaturnaya plazma (Low-Temperature Plasma), Novosibirsk, Nauka, 1999 [in Russian].
15. Asinovskiy E. I., Kirillin A. V. and Nizovskiy V. L., Stabilizirovannye elektricheskie dugi i ikh primeneniye v teplofizicheskom eksperimente (Stabilized Electric Arcs and Their Application in Thermophysical Experiment), 2-e izd., Moscow, Fizmatlit, 2008 [in Russian].
16. Gadzhiev M. K., Kulikov Y. M., Son E. E. et al., High Temp **58** (6), 12 (2020).
17. Goryachev S. V., Isakaev E. Kh., Myasnikov M. I. and Chinnov V. F., High Temp **46**, 752 (2008).
18. Konjevic N., Lesage A., Fuhr J. R. and Wiese W. L., J. Phys. Chem. Ref. **31** (3), 819 (2002).
19. Cagran C., Brunner C., Seifert A. and Pottlacher G., High Temperatures-High Pressures **34** (6), 669 (2002).
20. Cagran C., Pottlacher G., Rink M. and Bauer W., International Journal of Thermophysics **26** (4), 1001 (2005).