

УДК 533.9.082.5, 533.17
 EDN: HRCNKL

PACS: 47.60.Kz



Метод оптического контроля эрозии цилиндра при обтекании высокоэнтальпийной струей плазмотрона

Ю. М. Куликов, В. А. Панов, А. С. Савельев, Д. А. Кардаев, М. Х. Гаджиев

Приведены экспериментальные данные обтекания и разрушения вольфрамового стержня плазменной струей из щелевого выходного отверстия плазмотрона постоянного тока. Предложена методика оптической онлайн-диагностики изменения формы и объема обтекаемого образца на основе теневого метода с лазерной подсветкой. За время эксперимента 100 с на боковой (цилиндрической) поверхности стержня диаметром 2 мм сформировалась выраженная эрозия, а его масса уменьшилась на 0,2 г при обтекании плазмой из аргона (расход 2 г/с, среднемассовая скорость около 140 м/с, ток 150 А, напряжение 44 В). Контрольное измерение массы на точных весах показало хорошее совпадение результата обработки изображений с истинным значением. С помощью предложенного метода показана динамика изменения массы вольфрамового стержня за время эксперимента.

Ключевые слова: плазменная струя, затопленная струя, плазмотрон, обтекание стержня, вольфрам, эрозия, диагностика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-26-30

Введение

Генераторы низкотемпературной плазмы уже много десятилетий используются в аэродинамических испытаниях [1, 2] для имитации параметров высокоскоростного движения летательных аппаратов в атмосфере. В качестве

рабочего тела, как правило, используется воздух. Мощность данных дуговых установок может достигать 0,5–1,2 МВт при токе 160–400 А, расходе газа 70–170 г/с. Скорость движения на выходе из плазмотрона может превышать 1 км/с, оставаясь при этом дозвуковой.

Внутренняя и внешняя аэродинамика в подобных установках связана с изучением взаимодействия высокоэнтальпийных потоков газа с твердыми материалами. В работе [3] представлены результаты исследования уноса материалов наиболее теплонапряженных узлов трехфазного плазмотрона переменного тока «Звезда» мегаваттной мощности – электродов и конфузоров. Данные по уносу получены путем взвешивания исследуемых узлов после циклов их работы на фиксированных режимах. Показано влияние различных параметров режима работы на ресурс плазмотрона. С использованием полученных данных по эрозии электродов и конфузоров проведена оценка их ресурса. Исследования мощных плазмотронов переменного тока при работе на

 Куликов Юрий Матвеевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

 Панов Владислав Александрович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: panovvladislav@gmail.com

 Савельев Андрей Сергеевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

 Кардаев Денис Александрович², студент.

 Гаджиев Махач Хайрудинович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

¹ Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 26.04.2024

После доработки 10.05.2024

Принята к публикации 15.05.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

 © Куликов Ю. М., Панов В. А., Савельев А. С.,
 Кардаев Д. А., Гаджиев М. Х., 2024

углекислом газе [4] показали, что удельная скорость эрозии электродов при использовании CO_2 более чем в два раза ниже, чем при работе на воздухе.

В тоже время, обратная ситуация имеет место для конфузоров, для которых эрозия увеличилась по сравнению с воздухом. Связано это с тем, что вихревая подача газа в электроды обеспечивает наличие пристеночной области течения CO_2 с температурой до 2000 К, однако при этих температурах разложение CO_2 достаточно мало. В то же время газ, истекающий через конфузоры в камеру, имеет значительно большую среднюю температуру, при которой образуется молекулярный и атомарный кислород, что значительно повышает окислительные свойства газовой среды и, как следствие, приводит к повышенной по сравнению с воздухом эрозии.

Проблема износостойкости (эрозии) материала электродов в плазмотронах постоянного и переменного тока мощностью до 50 кВт изучалась и в [5]. Для изготовления электродов использовались медь, нержавеющая сталь и композитный материал состава железо-медь. По результатам проведенных экспериментов установлено, что образцы из стали 45Х25Н35С2 имеют достаточно хорошие эрозионные свойства, хотя и уступающие материалам состава железо-медь.

Взаимодействие плазмы с твердыми материалами находящимися в дисперсной фазе встречается в задачах напыления. В [6] 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. Одна из конструкций [7] использовалась для плазмохимического синтеза порошка карбида вольфрама. Наиболее успешные результаты синтеза получены в плазме водорода и метана в качестве плазмообразующих газов с расходом до 0,02 г/с, мощностью плазмотрона до 3 кВт.

Одним из недостатков дуговых плазмотронов является то, что даже крупные экспериментальные комплексы не могут полностью воспроизвести все тепловые механические нагрузки, возникающие в реальных условиях. В силу большой стоимости строительства и

эксплуатации (в частности, энергопотребления) имеет место долговременная тенденция замены лабораторных экспериментов на комбинацию из численного моделирования и непосредственных испытаний прототипов (натурных экспериментов). Производительность суперкомпьютеров и развитие численных методов позволяет проводить расчет многомасштабных (multiscale) задач с одновременным включением большого числа физических моделей (multiphysics): турбулентности [8], транспортных процессов [9], химии [10], межфазного взаимодействия [11, 12]. Как следствие, аэродинамические установки с плазменным подогревом часто используются для тестирования численных методов и калибровки упрощенных физических моделей.

Одним из недостатков использования дуговых плазмотронов является то, что течения внутри этих устройств оказываются значительно сложнее тех течений в аэродинамических трубах, с помощью которых они создаются [13]. Действительно, большую роль в нагреве газа в плазмотроне вне дуговой зоны играет излучение, испускаемое дуговым каналом, температура в котором может достигать 10^5 К, а характерные времена диффузионного, турбулентного смешения и рекомбинации оказываются сопоставимыми [14, 15].

Целью работы является исследование воздействия затопленной струи горячего газа на вольфрамовый стержень, размещенный в потоке вдоль центральной линии струи. При такой установке стержень оказывается полностью окруженным веществом (газом) затопленной струи. В процессе эксперимента исследуется изменение формы и массы стержня в результате теплового воздействия с помощью предложенного оптического метода диагностики с последующей обработкой изображений.

Метод и результаты обработки кинограмм

В качестве рабочего вещества в плазмотроне используется аргон, подаваемый в устройство с расходом $G = 2$ м/с. Параметры электрической дуги: сила тока $I = 150$ А, напряжение 44 В. Диаметр и длина стержня 2 и 165 мм соответственно. Кончик стержня

располагается на расстоянии в один его диаметр от среза сопла. Среднемассовые скорость и температура газа в струе составляют 140 м/с и 4000 К соответственно. Углы раскрытия струи в плоскостях вдоль и поперек длинной стороны щели составляют $(19 \pm 2)^\circ$ и $(11 \pm 2)^\circ$ соответственно. Схема теневой визуализации представлена на рисунке 1 и более детально описана ранее в работе [16].

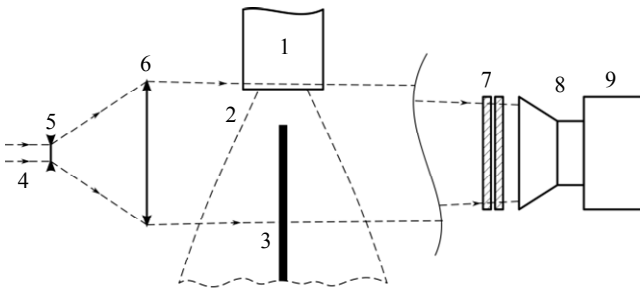


Рис. 1. Схема теневой визуализации высокотемпературной струи плазматрона: 1 – выход плазматрона; 2 – высокотемпературная струя; 3 – граница смещения струи и окружающего воздуха; 4 – лазерный луч; 5 – система рассеяния; 6 – собирающая линза; 7 – узкополосные фильтры; 8 – телеобъектив; 9 – скоростная видеокамера

Для получения динамики изменения формы и объема стержня применена следующая методика обработки полученных теневых фотографий. Съёмка проводилась на уменьшенном разрешении (320×256 пикселей), что позволило увеличить длительность кинограммы до 2 минут. Частота кадров составляла 200 к/с, а их максимально возможное число – около 25 000. Такое количество позволяет провести процедуру усреднения и, таким образом, вычислить изменение массы стержня. Для этого на полученных теневых фотографиях измеряется распределение диаметра $d(x)$ на всей видимой длине L стержня:

$$m = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^L d^2(x) dx,$$

где ρ – плотность материала стержня (вольфрам 18,64 г/см³). Эксперимент показывает, что стержень меняет геометрию, однако она остается осесимметричной. Величину массы видимой части стержня можно рассчитать для каждой из 25 000 фотографий и получить зависимость $m(t)$. Затем проводится процедура усреднения m по 100 точкам, что позволяет уменьшить влияние т. н. спеклов, у которых интенсивность изображения имеет низкое значение, как и у изображения непрозрачного стержня, на усредненное значение.

Для определения диаметра стержня d выполняется подсчет количества пикселей N , расположенных рядом друг с другом на одном расстоянии x от начального положения кончика вольфрамового стержня, интенсивность которых меньше I_{th} . Если $N(x) > N_{th}$, то считается, что этот набор пикселей может использоваться для реконструкции сечения стержня, и к общей массе m прибавляется величина

$$m = m + \frac{\pi\rho k^3}{4} N^2(x),$$

где k – пространственное разрешение оптической системы (0,0071429 см/пиксель).

Метод расчета стержня содержит несколько настроечных параметров, в частности значение пороговой интенсивности I_{th} . На рисунке 2 представлены части фотографий, используемые для вычисления величины $m(t)$ в следующие моменты времени: 0 с (начало съемки), 0,5 с (нагрева нет), 5 с (нагрев происходит), 50 с (нагрев происходит), 100 с (нагрев окончен). Белые пиксели соответствуют тем пикселям, у которых интенсивность меньше I_{th} .

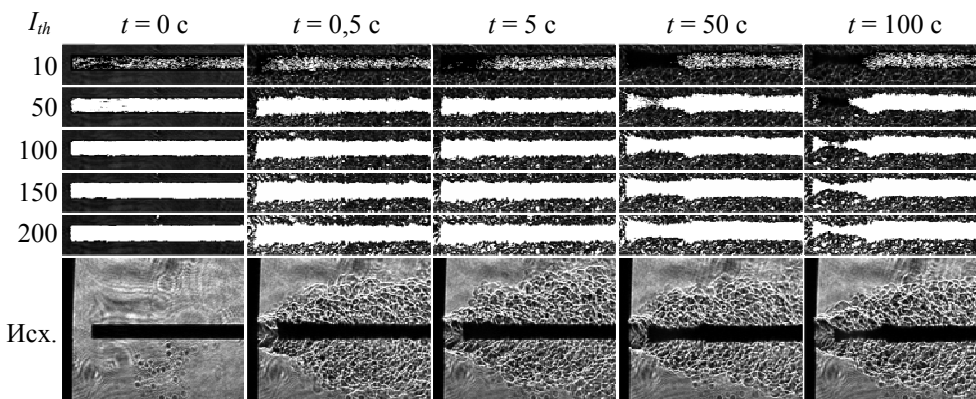


Рис. 2. Пример результата обработки части теневых фотографий, полученных в различные моменты времени t , при различной величине I_{th} , а также исходные теневые фотографии (нижняя строка)

Видно, что от выбора величины I_{th} зависит получаемый результат, однако при задании $I_{th} > 100$ оказывается, что изменение массы стержня за время нагрева его струей остается одинаковым. При этом величина m тем больше, чем больше I_{th} . Это связано с тем, что при большей величине I_{th} в расчет принимаются те пиксели, которые соответствуют спеклам, видимым на теневых фотографиях из-за наличия неустойчивости на границе раздела горячая струя – холодный окружающий воздух. В данном случае предполагается, что, во-первых, таких пикселей в целом на изображении немного, во-вторых, от кадра к кадру они появляются случайно, но в одинаковом количестве. Это позволяет рассчитать не массу стержня от времени, а его изменение Δm за время нагрева струей. По представленным зависимостям вычислена величина Δm , которая составила около 0,2 г.

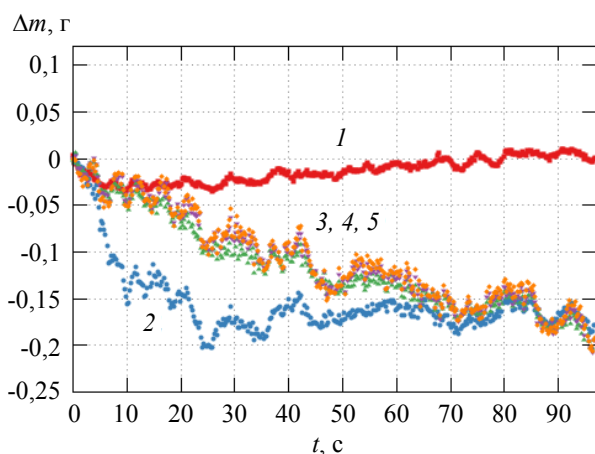


Рис. 3. Зависимость измеренной массы видимой части стержня от времени пребывания в струе при различных значениях пороговой интенсивности I_{th} : 1) 10, 2) 50, 3) 100 (зеленый), 4) 150 (фиолетовый), 5) 200 (оранжевый)

На рисунке 3 представлен график зависимости $\Delta m(t)$ при различных значениях I_{th} . Начальный участок кривых 3, 4 и 5 на рисунке 3 демонстрирует колебания относительно некоторого постоянного значения вплоть до 20 с, после чего начинается заметное изменение. Данный участок, по-видимому, связан со стадией прогрета стержня, а также с малостью величины изменения массы, которую невозможно достоверно различить на фоне погрешности метода, которую можно принять на уровне 0,05 г в данных условиях постановки эксперимента.

Выводы

Разработана экспериментальная методика оценки изменения формы и объема образца цилиндрической формы по данным теневой визуализации. Полученные результаты находятся в согласии с данными контрольного взвешивания стержня. Изменения формы образца свидетельствуют о прохождении окислительных процессов на поверхности материала образца. Имеет место образование осесимметричной выемки на расстоянии в несколько калибров от торца стержня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротеев А. С., Миронов В. М., Свирчук Ю. С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчёт. – М.: Машиностроение, 1993.
2. Жуков М. Ф., Засыпкин И. М., Тимошевский А. Н., Михайлов Б. И., Десятков Г. А. Низкотемпературная плазма. Т. 17. – Новосибирск: Наука, 1999.
3. Кошлаков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А. / Прикладная физика. 2021. № 4. С. 32–39.
4. Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 103–108.
5. Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д. / Прикладная физика. 2019. № 3. С. 24–30.
6. Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. Б. / Прикладная физика. 2022. № 2. С. 72–77.
7. Дудник Ю. Д., Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. Б., Гаврилова Д. А., Гаврилова М. А. / Прикладная физика. 2023. № 5. С. 103–109.
8. Menter F., Hüppe A., Matyushenko A., Kolmogorov D. / Appl. Sci. 2021. Vol. 11. № 6. P. 2459.
9. D'Angola A., Colonna G., Gorse C., Capitelli M. / Eur. Phys. J. D. 2008. Vol. 46. P. 129–150.
10. Kiris C. C., Barad M. F., Housman J. A., Sozer E., Brehm C., Moini-Yekta S. Proc. 52nd Aerospace Sciences Meeting. National Harbor, Maryland, 2014, pp. AIAA 2014-0070.
11. Hoang V. T., Do-Le H.-T., Vo D. H. / Chem. Eng. Sci. 2023. Vol. 282. P. 119232.
12. Ewing M. E., Laker T. S., Walker D. T. / J. Thermophys. Heat Transfer. 2013. Vol. 27. № 4. P. 615–632.
13. Турский Г. А., Сахаров В. И., Ковалев В. Л. Гиперзвуковая аэродинамика и теплообмен спускаемых космических аппаратов и планетных зондов. – М.: Физматлит, 2011.
14. Fincke J. R., Chang C. H., Swank W. D., Haggard D. C. / Int. J. Heat Mass Transfer. 1994. Vol. 37. № 11. P. 1673–1682.
15. Williamson R. L., Fincke J. R., Crawford D. M., Snyder S. C., Swank W. D., Haggard D. C. / Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. № 22. P. 4215–4228.
16. Панов В. А., Куликов Ю. М., Савельев А. С., Токунов Ю. М., Гаджиев М. Х. / Прикладная физика. 2024. № 2. С. 72–78.

Optical method for erosion control of a cylinder placed in a high-enthalpy jet of plasma torch

Yu. M. Kulikov¹, V. A. Panov¹, A. S. Saveliev¹, D. A. Kardaev² and M. Kh. Gadzhiev¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: panovvladislav@gmail.com

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 26.04.2024; revised 10.05.2024; accepted 15.05.2024

Experimental data on the flow and destruction of a tungsten rod by a plasma jet from the slotted outlet of a direct current plasma torch are presented. A technique for online optical diagnostics of changes in the shape and volume of a streamlined sample is proposed based on the shadow method with laser illumination. During the 100 s experiment, pronounced erosion formed on the side (cylindrical) surface of a rod with a diameter of 2 mm, and its mass decreased by 0.2 g when argon gas flowed around (flow rate 2 g/s, average mass velocity about 140 m/s, current 150 A, voltage 44 V). A control measurement of mass on precise scales showed a good agreement between the image processing result and the true value. Using the proposed method, the dynamics of mass changes during the experiment is shown.

Keywords: plasma jet, flooded jet, plasma torch, flow around a rod, tungsten, erosion, diagnostics.

REFERENCES

1. Koroteev A. S., Mironov V. M. and Svirchuk Yu. S., *Plazmotrony. Konstrukcii, harakteristiki, raschyot*, Moscow, Mashinostroenie, 1993 [in Russian].
2. Zhukov M. F., Zasytkin I. M., Timoshevskij A. N., Mihajlov B. I. and Desyatkov G. A., *Nizkotemperaturnaya plazma*, Vol. 17, Novosibirsk, Nauka, 1999 [in Russian].
3. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N. and Fedorov I. A., *Applied Physics*, № 4, 32–39 (2021) [in Russian].
4. Rebrov S. G., Golikov A. N. and Fedorov I. A., *Applied Physics*, № 2, 103–108 (2023) [in Russian].
5. Kuznetsov V. E., Safronov A. A., Shiryayev V. N., Vasilieva O. B. and Dudnik Yu. D., *Applied Physics*, № 3, 24–30 (2019) [in Russian].
6. Kuznetsov V. E., Dudnik Yu. D., Safronov A. A., Shiryayev V. N. and Vasilieva O. B., *Applied Physics*, № 2, 72–77 (2022) [in Russian].
7. Dudnik Yu. D., Kuznetsov V. E., Safronov A. A., Shiryayev V. N., Vasilieva O. B., Gavrilova D. A. and Gavrilova M. A., *Applied Physics*, № 5, 103–109 (2023) [in Russian].
8. Menter F., Hüppe A., Matyushenko A. and Kolmogorov D., *J. Appl. Sci.* **11** (6), 2459 (2021).
9. D'Angola A., Colonna G., Gorse C. and Capitelli M., *Eur. Phys. J. D.* **46**, 129–150 (2008).
10. Kiris C. C., Barad M. F., Housman J. A., Sozer E., Brehm C. and Moini-Yekta S. *Proc. 52nd Aerospace Sciences Meeting. National Harbor, Maryland, 2014*, pp. AIAA 2014-0070.
11. Hoang V. T., Do-Le H.-T. and Vo D. H., *Chem. Eng. Sci.* **282**, 119232 (2023).
12. Ewing M. E., Laker T. S. and Walker D. T., *J. Thermophys. Heat Transfer.* **27** (4), 615–632 (2013).
13. Tirkij G. A., Saharov V. I. and Kovalev V. L., *Giperzvukovaya aerodinamika i teplomassoobmen spускаemyh kosmicheskikh apparatov i planetnyh zondov*, Moscow, FIZMATLIT, 2011 [in Russian].
14. Fincke J. R., Chang C. H., Swank W. D. and Haggard D. C., *Int. J. Heat Mass Transfer.* **37** (11), 1673–1682 (1994).
15. Williamson R. L., Fincke J. R., Crawford D. M., Snyder S. C., Swank W. D. and Haggard D. C., *Int. J. Heat Mass Transfer.* **46** (22), 4215–4228 (2003).
16. Panov V. A., Kulikov Yu. M., Saveliev A. S., Tokunov Yu. M. and Gadzhiev M. Kh., *Applied Physics*, № 2, 72–78 (2024) [in Russian].