

04

Разработка горячей графитовой камеры смешения с затопленной струей для плазмотрона постоянного тока

© М.Х. Гаджиев, Е.П. Пахомов, М.В. Ильичев, В.П. Петровский

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: makhach@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 июня 2025 г.

В окончательной редакции 17 августа 2025 г.

Принято к публикации 18 августа 2025 г.

Создана конструкция горячей графитовой камеры перемешивания потока для плазмотрона постоянного тока, обеспечивающая нагрев графитовой мишени молекулярным газом (азот) до температуры выше 3000 К без возникновения „термомеханической“ эрозии за счет создания более однородного стационарного газового потока.

Ключевые слова: плазмотрон, графит, однородный поток газа, термомеханическая эрозия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.22.61583.20410

Термическая (дуговая) плазма, генерируемая плазмотроном, представляет собой высокоэффективный инструмент, широко применяемый в разнообразных сферах науки и техники [1]. Одним из ключевых направлений ее использования является моделирование эксплуатационных условий материалов и конструктивных элементов, функционирующих в экстремальных температурных режимах [2–4]. Применение данного метода позволяет детально исследовать физико-химические процессы, протекающие в материалах при высоких температурах, что способствует повышению их эксплуатационных характеристик и надежности.

Для моделирования таких условий с конца 1970-х годов были созданы крупномасштабные плазменные стенки, разработанные на основе источников плазмы постоянного тока или высокочастотной индуктивно связанной плазмы [5,6]. При этом для обеспечения требуемого теплового потока на поверхности образцов необходимо использовать сложные и дорогостоящие установки [7,8].

Цель настоящего исследования, являющегося продолжением работы [4], состоит в создании лабораторного устройства, способного успокоить пульсирующий поток плазмы, генерируемый плазмотроном, для обеспечения нагрева поверхности образцов материалов однородным потоком воздуха до температур до 3000 К и выше.

Плазмотрон постоянного тока с контрагированной дугой, несмотря на его ключевое преимущество, заключающееся в достижении высоких значений удельной энтальпии, обладает существенным недостатком, который выражается в наличии хаотических пульсаций генерируемого плазменного потока как во времени, так и в пространстве. Эти колебания обусловлены динамическим взаимодействием электрического тока дуги с ее собственным магнитным полем, что приводит к значительным флуктуациям плотности теплового потока. В результате наблюдаются пульсации (с частотой в десятки кГц) температуры нагрева поверхности исследуемого образца, что особенно критично для хрупких материалов, таких как графит.

Флуктуации температуры вызывают пульсации нагрева поверхности графита, что инициирует циклы расширения-сжатия в его зерновой структуре. В хрупком материале с более слабыми межзеренными связями эти циклы приводят к разрушению последних и отрыву отдельных зерен, которые затем уносятся плазменным потоком. Этот процесс представляет собой термомеханический механизм, ответственный за потерю массы поверхностью образца.

В процессе исследования работы плазмотрона постоянного тока на молекулярном азоте с неохлаждаемым графитовым каналом различной конфигурации (с воздействием на поток с помощью твердых стенок, таких как винтовые участки и рассекатели, для минимизации термомеханической эрозии) [4] было установлено, что при температурах выше 2500 К достижение удельной скорости потери массы изотермически нагреваемых графитовых образцов менее $10^{-5} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ представляется практически невозможным. Однако на атомарном газе (аргон) такие значения были достигнуты.

В связи с этим был разработан метод перемешивания плазменного потока без применения дополнительного (кроме цилиндрических стенок канала) воздействия внешних твердых стенок. Данный подход основывается на использовании горячей камеры смешения с затопленной струей. Принцип работы заключается в следующем: плазменный поток, генерируемый плазмотроном, направляется в закрытую графитовую полость с одним или несколькими боковыми выходами в верхней части (рис. 1). Такое радикальное изменение направления потока обеспечивает его эффективное перемешивание. Экспериментальные данные подтвердили высокую эффективность данного метода: во всех проведенных опытах с использованием такой горячей камеры смешения полностью прекратился вылет светящихся микрочастиц

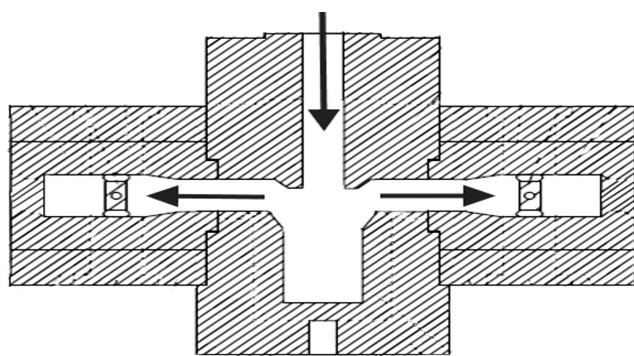


Рис. 1. Принципиальная схема камеры смешения с затопленной струей с двумя выходными каналами для обдува установленных образцов.

графита, являющихся результатом термомеханического разрушения поверхности под воздействием хаотических термоударов (рис. 2).

В качестве источника плазмы использовался трех-электродный (катод со вставкой из лантанированного вольфрама—межэлектродная вставка—анод) генератор низкотемпературной плазмы постоянного тока с вихревой подачей газа и диаметром газоразрядного канала 8 мм с КПД $\sim 80\%$ для азота, обеспечивающий формирование на выходе плазменного потока диаметром $D = 8\text{--}10\text{ мм}$ с энтальпией до 50 кДж/г и среднemasсовой температурой 10–11 кК, при полной электрической мощности дугового разряда до 50 кВт и расходе плазмообразующего газа 1–3 г/с [9].

В качестве основных контролируемых параметров были выбраны: а) истинная температура нагреваемых практически изотермически графитовых образцов марки МПГ-6 ($\varnothing 8 \times 4\text{ мм}$) с моделью черного тела в них — глухим сверлением ($\varnothing 2 \times 6\text{ мм}$), устанавливаемых в выходных каналах перпендикулярно потоку, как показано на рис. 1; б) их потеря массы. Измерение температуры выполнялось с помощью яркостного пирометра Raytek 1M, работающего на

длине волны 1 мкм (размер поля визирования 0.6 мм, погрешность 0.3% от измеряемой величины +1 К), через отверстие $\varnothing 2.5\text{ мм}$ в боковой стенке канала. Максимальная измеряемая пирометром температура 3300 К. Масса образца и всех остальных элементов горячего тракта измерялась до и после каждого опыта. Видеосъемка потока плазмы из камеры смешения производилась с помощью скоростной видеокамеры MotionPro.

Скоростная видеосъемка струи, истекающей из камеры смешения с затопленной струей, показала (рис. 3), что на ее выходе действительно формируется стабильный поток, судя по видеосъемке, с близким к прямоугольному радиальным профилем температуры. Светящиеся треки — частицы оксида железа от окисляющегося стального фланца крепления.

Такое решение позволяет пристыковывать к камере смешения не один, а несколько экспериментальных каналов с исследуемыми образцами, что существенно увеличивает производительность и надежность исследований. На рис. 1 и 2 представлена конструкция с двумя идентичными каналами.

На рис. 2, с показано состояние такой сборки во время испытания. Видно, что камера смешения сильно разогревается (по цвету свечения заведомо выше 1500 К на внешней поверхности при токе дуги 300 А, отмечено плавление стальных элементов от излучения стенок), поэтому необходимо хорошо экранировать (теплоизолировать) все окружающие сборку металлические детали.

При этом удельная скорость окисления внешней поверхности из-за ее обдува потоком воздуха в результате естественной конвекции не превышала $2 \cdot 10^{-3}\text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (0.6 мм/мин). Удельная скорость потери массы поверхностями элементов горячего тракта и испытываемых образцов при температуре образцов до 2700 К была меньше $10^{-5}\text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

При увеличении тока дуги более $\sim 300\text{ А}$ (диаметр канала плазмотрона 8 мм) внутренняя поверхность камеры смешения разогревается, видимо, выше температуры сублимации графита, в результате чего рез-

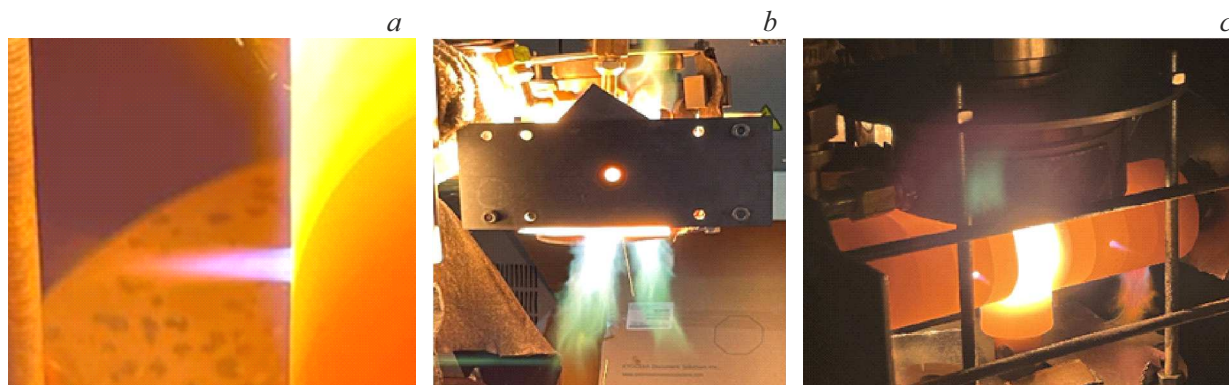


Рис. 2. Вид струи азота из наружного оптического отверстия диаметром 4 мм при токе дуги 250 А (а) и из выходных отверстий сборки (б), а также общий вид во время работы (с).

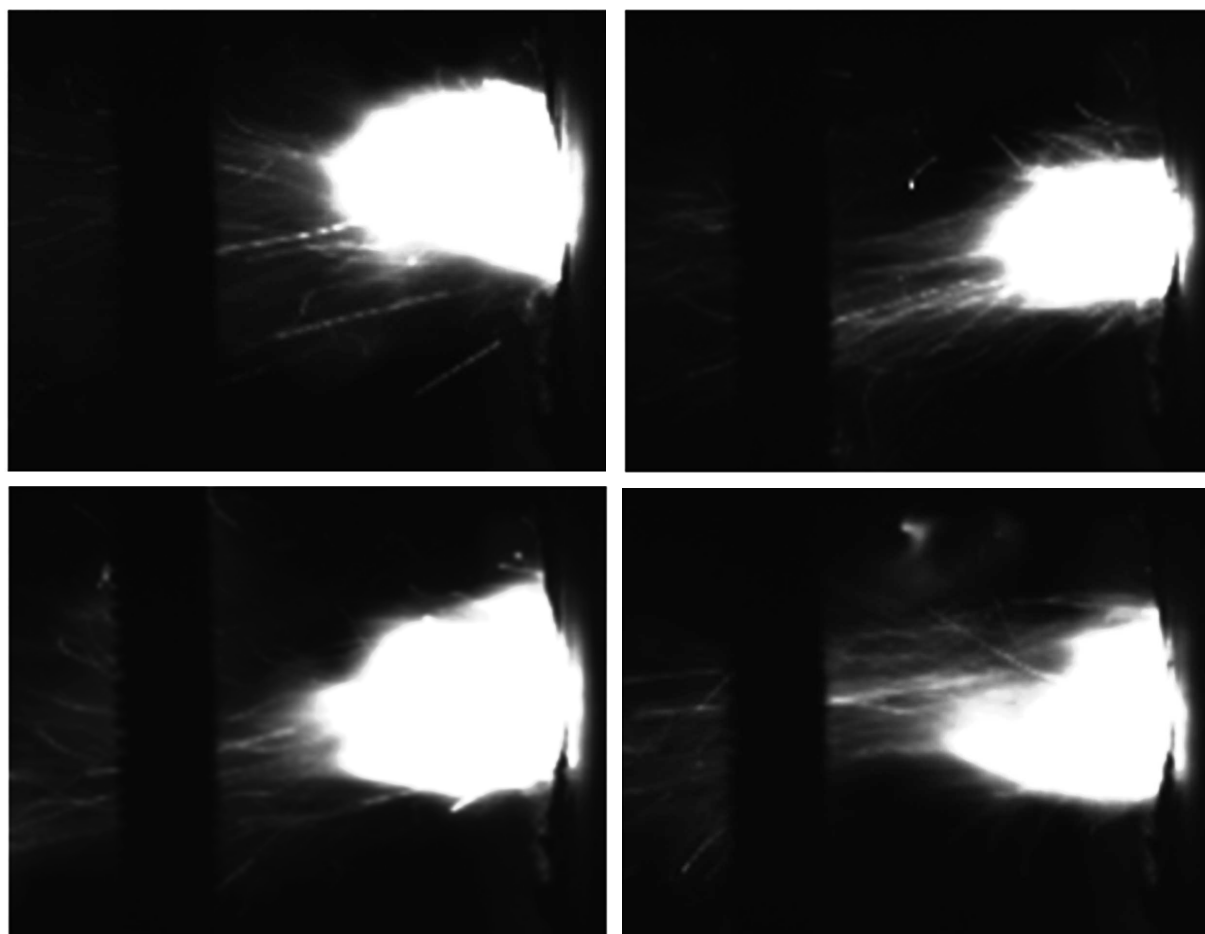


Рис. 3. Последовательные кадры видеосъемки с частотой 1000 Hz струи плазмы азота, истекающей из камеры смешения с затопленной струей при токе дуги 300 А и экспозиции $100 \mu\text{s}$.

ко растут ее потери массы. При этом на прочих элементах горячего тракта и на исследуемых образцах фиксируется уже не потеря массы, а ее увеличение (из-за осаждения сажи, часто в виде шариков).

Как и ранее, не было зафиксировано случаев разрушения хорошо секционированных элементов сборки из-за термонапряжений.

Таким образом, предложено конструктивное решение, обеспечивающее эффективное подавление пространственных и временных пульсаций температуры в генерируемом плазмотроне потоке плазмы и тем самым обеспечивающее исключение воздействия механизма термомеханической эрозии на поведение поверхности нагреваемых образцов графита.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.I. Boulos, P.L. Fauchais, E. Pfender, *Handbook of thermal plasmas* (Springer, Cham, 2023).
- [2] А.Ф. Колесников, С.А. Васильевский, С.Л. Щелоков, А.В. Чаплыгин, С.С. Галкин, Изв. РАН. Механика жидкости и газа, № 6, 116 (2022). DOI: 10.31857/S0568528122600503 [A.F. Kolesnikov, S.A. Vasil'evskii, S.L. Shchelokov, A.V. Chaplygin, S.S. Galkin, *Fluid Dyn.*, **57** (6), 811 (2022). DOI: 10.1134/S0015462822601309].
- [3] Д.С. Михатулин, Ю.В. Полежаев, Д.Л. Ревизников, *Тепло-массообмен, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты* (Янус-К, М., 2011).
- [4] М.Х. Гаджиев, Е.П. Пахомов, В.П. Петровский, Д.И. Юсупов, Письма в ЖТФ, **50** (8), 15 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57514.19753 [M.Kh. Gadzhiev, E.P. Pakhomov, V.P. Petrovskiy, D.I. Yusupov, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (4), 55 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57514.19753].
- [5] M. Auweter-Kurtz, *Overview of IRS plasma wind tunnel facilities*, paper presented at the RTO AVT Course on „Measurement's techniques for high enthalpy and plasma flows“ (Rhode-Saint-Genèse, Belgium, 1999); published in RTO EN-8 (2000), p. 2A1–2A20.

- [6] M. Hinada, Y. Inatani, T. Yamada, K. Hiraki, *An arc heated high enthalpy test facility for thermal protection studies*, report N 664 (Institute of Space and Astronautical Science, 1996).
- [7] S. Loehle, F. Zander, T. Hermann, M. Eberhart, A. Meindl, R. Oefele, J. Vaubailon, F. Colas, P. Vernazza, A. Drouard, J. Gattacceca, *Astrophys. J.*, **837**, 112 (2017).
DOI: 10.3847/1538-4357/aa5cb5
- [8] G. Herdrich, M. Auweter-Kurtz, H. Böhrk, M. Fertig, S. Löhle, *Test facilities for high enthalpy planetary entry simulation*, special publication (European Space Agency, 2006), ESA SP-631, id 50.
- [9] Э.Х. Исакаев, О.А. Синкевич, А.С. Тюфтяев, В.Ф. Чиннов, *ТВТ*, **48** (1), 105 (2010). [E.Kh. Isakaev, O.A. Sinkevich, A.S. Tyuftyaev, V.F. Chinnov, *High Temp.*, **48** (1), 97 (2010).
DOI: 10.1134/S0018151X10010141].