УДК 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2016-31-3-24-30

Э.Х. Исакаев, В.Ф. Чиннов, А.С. Тюфтяев, М.Х. Гаджиев, А.Г. Агеев, Д.И. Кавыришин, М.А. Саргсян, Д.И. Юсупов, Н.А. Демиров

**Измерение пространственно-временных распределений параметров в системе
«плазменная струя – термостойкий образец»**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН; Россия, 125412, Москва, Ижорская, 13, строение 2; takhach@mail.ru

Воздействие созданного мощным плазмотроном (до 1 МВт) высокоэнтальпийного потока плазмы воздуха ($H \geq 20$ кДж/г) диаметром 60÷80 мм на изотропный графитовый образец, находящийся на расстоянии 200 мм от среза сопла (скорость струи 50–150 м/с, температура 6500÷7500 К и концентрация электронов $(2\div3) \cdot 10^{15}$ см⁻³), приводит к разогреву образца до температуры 2400÷2600 К и интенсивной сублимации графита со скоростью около 2.5 мг/см²с.

Ключевые слова: *плазмотрон, спектроскопия, микропирометрия, сублимация, скоростная визуализация.*

Введение

Исследование разрушения термостойких теплозащитных материалов под воздействием высокотемпературной плазменной струи, сопровождающегося протеканием многочисленных сложных и взаимосвязанных процессов, является актуальной научно-технической задачей [1–5]. Принципиально важным является исследование параметров и характеристик взаимодействующей нестационарной системы «высокоэнтальпийная плазменная струя – исследуемый образец», таких, как энтальпия плазмы набегающего потока; его скорость и температура; химический и ионизационный состав плазмы; падающий на образец тепловой поток; температура поверхности образца; скорость уноса (убыли) массы материала образца и др.

Методика эксперимента

Для решения поставленных задач использовался экспериментальный исследовательский комплекс (рис. 1), включающий в себя генератор низкотемпературной плазмы (ГНП), водоохлаждаемую камеру наблюдений истекающего из плазмотрона высокоскоростного потока, систему измерительных приборов и устройств и охлаждаемый приемник потока плазмы после его воздействия на образец. Экспериментальный стенд оснащен следующим оборудованием и приборами.

1. В качестве источника высокоэнтальпийного плазменного потока использован мощный (до 1 МВт) генератор воздушной плазменной струи ($H \geq 20$ кДж/г) с расширяющимся каналом выходного электрода [6], относящийся к классу плазмотронов постоянного тока с термоэмиссионным катодом. Обладая КПД ≈ 80 %, он обеспечивает формирование на выходе слабо расходящейся ($2\alpha = 12^\circ$) плазменной струи диаметром $D = 50$ мм и среднemasсовой температурой 8000÷12000 К.

2. Водоохлаждаемая камера из нержавеющей стали с системой охлаждения (рис. 1) для исключения воздействия мощной плазменной струи на окружающую среду.

3. Водоохлаждаемая штанга ввода образца, позволяющая провести калориметрические измерения и оценку скорости плазменного потока.

4. Система ввода фильтров для использования цветной камеры в качестве быстросрабатывающего микропирометра.

5. Высокоскоростная черно-белая камера Phantom Miro M110, осуществляющая скоростную регистрацию ($\nu = 50 \div 50000 \text{ с}^{-1}$, $\tau_{\text{эксп}} = 2 \div 100 \text{ мкс}$) области взаимодействия «струя–мишень» в масштабе 1:2 в течение всего экспериментального цикла.

6. Высокоскоростной микропирометр «FMP1001», осуществляющий синхронизованный мониторинг температуры на выбранном участке (диаметром $1.5 \div 2 \text{ мм}$) поверхности образца, например в кратере, с погрешностью определения температуры $3 \div 5 \%$ в диапазоне $1200 \div 5000 \text{ К}$.

7. Трехканальный оптоволоконный спектрометр AvaSpec–2048 (спектральный диапазон $220 \div 850 \text{ нм}$) со спектральным разрешением $0.2 \div 0.5 \text{ нм}$ выполняет мониторинг радиального распределения излучения плазменной струи из приповерхностной зоны плазмы при непрерывном поперечном перемещении оптоволоконного световода.

8. Одноканальный оптоволоконный спектрометр AvaSpec–3648 с диапазоном $220 \div 1100 \text{ нм}$ и спектральным разрешением около 1 нм , который регистрирует излучение плазмы вдоль продольной координаты набегающего на образец плазменного потока.

9. Импульсно-периодический лазер, синхронизованный с камерой Phantom Miro, с помощью телескопа и цилиндрической линзы обеспечивает создание «лазерного ножа» в зоне взаимодействия. Назначение этой системы – непрерывная регистрация камерой Phantom Miro профиля поверхности модели ГЛА, разрушаемого плазменной струей.

10. Система синхронизованного управления измерительным комплексом.

На кронштейнах-манипуляторах и оптических столах (рис. 1) размещены приборы исследовательского комплекса, осуществляющие визуальные, пирометрические и спектральные измерения. Методика эксперимента и возможности используемого оборудования подробно описаны в работе [7].

Результаты и их обсуждение

Из расширяющегося анодного канала плазматрона высокоэнтальпийная плазменная струя истекает в водоохлаждаемую камеру с объемом около 300 л и системой смотровых окон в боковой цилиндрической поверхности и верхней фланцевой поверхности (рис. 1).

Рис. 1. Экспериментальный комплекс: 1 – плазматрон; 2 – камера; 3 – приемник-охладитель плазмы; 4 – оптический стол; 5 – головка световода AvaSpec–3648 с микроприводом; 6 – головка световода AvaSpec–2048 с микроприводом; 7 – кварцевые конденсоры; 8 – скоростная камера VS-FAST; 9, 11, 17 – микропривод интерференционных фильтров; 10 – сверхскоростная камера Phantom; 12 – микропирометр; 13 – импульсно-периодический лазер; 14 – телескоп; 15 – линза цилиндрическая; 16 – скоростная камера Motion Pro

Рис. 2. Зона взаимодействия «струя–образец», регистрируемая камерой Motion Pro. Частота кадров 30 с^{-1} , экспозиция 20 мкс. Движение плазмы слева направо

На рис. 2 представлена картина воздействия воздушной плазменной струи с температурой $7000 \div 8000 \text{ К}$ на образец из изотропного графита марки МПГ-6, выполненного в виде полусферы диаметром $d_0 = 40 \text{ мм}$ с цилиндрическим основанием того же диаметра и полной высотой 30 мм . В области взаимодействия, удаленной от выходного сопла плазматрона на 200 мм , видимый диаметр плазменной струи $D \approx 60 \div 80 \text{ мм} > d_0$.

Спектральные измерения с помощью трехканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec–2048, выполняющего мониторинг радиального распределения излучения плазменной струи в выбранном ее сечении при непрерывном поперечном перемещении оптоволоконного световода, обеспечивают контроль за временным изменением (с периодичностью $2 \div 4 \text{ спектр/с}$) плазмохимического состава и параметров плазмы. Одноканальный оптоволоконный спектрометр AvaSpec–3648 регистрирует излучение плазмы вдоль продольной координаты плазменного потока. Мониторинг пространственно-временных изменений спектров излучения плазмы, осуществляемый путем сканирования световодами спектрометров плоскости промежуточного резкого изображения плазменной струи, дает детальное представление об изменении спектрального состава плазмы и интенсивности ее излучения на протяжении всего цикла взаимодействия. Анализ полученных спектров выполнялся с использованием модельных представлений о параметрах неравновесной плазмы, развитых в работах [8, 9]. Примеры наблюдаемых спектров приведены на рис. 3 при воздействии на образец из изотропного графита плазменной струи воздуха с температурой $6500 \div 7500 \text{ К}$, с концентрацией электронов $(2 \div 3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Способом измерения основной составляющей скорости в нашем исследовании может быть определение скорости движения наблюдаемых оптических неоднородностей свечения плазмы, обусловленных турбулизацией струи (рис. 2). Недостатком такого измерения скорости движения выделенного характерного (по форме, цвету) участка турбулентной струи является отсутствие привязки получаемого в координате z значения скорости к поперечной координате r , поскольку при поперечном наблюдении свечение струи интегрируется вдоль луча зрения.

Рис. 3. Спектр излучения плазмы при обдуве графитового образца

На рис. 4 показаны картины видеорегистрации оптических неоднородностей, вызванных турбулизацией плазмы, где время экспозиции составляет 20 мкс, а время между соседними кадрами – 200 мкс. На заднем плане справа виден полукруг смотрового окна диаметром 40 мм, задающий масштаб видеограмм. На участке 40 мм происходит падение скорости струи с 180 до 140 м/с. Полученные с помощью трехцветной матрицы видеограммы свечения образцов позволяют, используя видеокамеру в качестве быстродействующего микропирометра с пространственным разрешением [10], получить поля температуры на поверхности образцов. На рис. 5 приведены примеры зарегистрированных видов свечения образцов и результатов их программного преобразования в поле температур с использованием калибровки яркости по эталонному источнику излучения.

Рис. 4. Видеорегистрация оптических неоднородностей, вызванных турбулизацией плазмы

Интерференционный фильтр с полушириной пропускания 12 нм (используемый и при регистрации свечения эталонного источника) вырезает спектральный участок названной ширины, свободный от интенсивных спектральных линий плазмы, во избежание влияния плазменного излучения на результат пирометрии. Для обеспечения минимальной погрешности определения температуры образцов, изменяющейся в диапазоне 1500÷3500 К, излучение эталонного источника ($T_{\text{я}} = 2400$ К) регистрировалось с использованием той же рабочей оптической схемы, что и при нагреве образцов, с варьируемым временем экспозиции и использованием стандартизированных нейтральных фильтров. Исследования показали, что графитовый образец прогревается до температуры 2500÷2600 К. При этом скорость уноса массы образца, определенная методами взвешивания, «лазерного ножа» и двухпозиционной томографии [7], составляет ~ 2.5 мг/см²с.

Выводы

Программная обработка спектров излучения плазменной струи и образца, а также результатов скоростной визуализации нагретой его поверхности позволила получить данные о пространственно-временных изменениях температуры плазмы и поверхности образца. Анализ результатов двухпозиционной визуализации зоны «плазменная струя – образец» выявил временной ход скорости убыли испытуемого материала в процессе плазменного воздействия. Отметим в заключение, что одновременное использование нескольких методов определения таких важнейших параметров, как температура и скорость движения плазмы, температура поверхности образца, скорость убыли его материала, обеспечивает повышение точности и надежности проводимых комплексных измерений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-08-00323 и 16-38-00891.

Рис. 5. Видеограммы и поля температур поверхности образца при нагреве изотропного образца в воздушной плазменной струе

Литература

1. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976.
2. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен, термохимическое и термозрозионное разрушение тепловой защиты. – М.: Янус-К, 2011.
3. Основы теплообмена в авиационной и ракетно-космической технике / под ред. В.С. Авдеевского, В.К. Кошкина. – М.: Машиностроение, 1992.
4. Теоретическая механика, термодинамика, теплообмен / под ред. акад. К.С. Колесникова, акад. А.И. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 2000. – Т1–2.

5. Суржиков С.Т. Расчетное исследование аэротермодинамики гиперзвукового обтекания затупленных тел на примере анализа экспериментальных данных. – М.: Изд-во ИПМех РАН, 2011. – 192 с.

6. Гаджиев М.Х., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И. Мощный генератор низкотемпературной плазмы воздуха с расширяющимся каналом выходного электрода // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 2. – С. 44–49.

7. Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Саргсян М.А., Демиров Н.А., Щербаков В.В. Диагностический комплекс для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. Естественные науки. – 2016. – Т. 31, вып. 1. – С. 22–27.

8. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 2006. – 472 с.

9. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. – 378 с.

10. Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Мясников М.И., Чиннов В.Ф. Исследование полей температуры поверхности вольфрамового катода сильноточной дуги с помощью высокоскоростной матрицы // ТВТ. – 2008. – Т. 46, № 6. – С. 1–6.

Поступила в редакцию 14 сентября 2016 г.

UDK 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2016-31-3-24-30

Measurement of spatial and temporal parameters distribution in the system “plasma jet – heat resistant sample”

E.Kh. Isakayev, V.F. Chinnov, A.S. Tyuftyaev, M.Kh. Gadzhiyev, A.G. Ageev, D.I. Kavyrshin, M.A. Sargsyan, D.I. Yusupov, N.A. Demirov

Joint Institute for High Temperatures RAS; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya, 13, Bd. 2; makhach@mail.ru

The impact of high-enthalpy air plasma stream ($H \geq 20$ kJ/g) with a diameter of 60÷80 mm created by a powerful plasma torch (up to 1 MW) on isotropic graphite sample that is located at a distance of 200 mm from the nozzle outlet (jet velocity of 50÷150 m/s, temperature 6500÷7500 K and the electron concentration $(2\div3) \cdot 10^{15}$ cm⁻³), leads to heating of the sample to a temperature of 2400÷2600 K and intensive ablation of the graphite at a rate of about 2.5 mg/cm²s.

Keywords: *plasmatron, spectroscopy, micropyrrometry, sublimation, high-speed visualization.*

Received 14 September, 2016