

УДК 533.9:536.2

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Р. Р. ГАРЕЕВ¹, Н. М. ЦИРЕЛЬМАН²

¹ruslangr@yandex.ru, ²at-t@ugatu.ac.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.12.2013

Аннотация. Предложен и исследован контактный метод идентификации температуры плазменной струи на срезе сопла атмосферного плазмотрона. Впервые для этих целей было использовано аналитическое решение граничной обратной задачи теплопроводности. Проведена верификация метода и экспериментальные исследования, которые выявили его практическую значимость.

Ключевые слова: плазменная струя; плазмотрон; контактный метод; температура; теплопроводность; обратная задача.

При изготовлении деталей конструкций современной авиационной и ракетно-космической техники всё чаще используются сплошные или локальные покрытия их поверхностей из материалов, обеспечивающих эффективную защиту конструкций от воздействий агрессивных сред, высоких температур, фреттингового, кавитационного и механического износа. Установлено, что технология плазменного нанесения покрытий является одной из наиболее перспективных, так как позволяет получить требуемые эксплуатационные характеристики изделий при сравнительно невысокой стоимости производственного процесса.

Анализ известных результатов исследований и собственного опыта работы авторов приводит к выводу о том, что качество получаемых покрытий в значительной степени зависит от технологических параметров напыления (например, [1]). Это ставит задачу проведения постоянного оперативного контроля технологических параметров напыления покрытий.

Важнейшим параметром, влияющим на качество сцепления покрытия с подложкой, является температура плазменной струи на срезе сопла атмосферного плазмотрона [2]. Следует подчеркнуть, что почти все измерения температур газов, превышающих 2000 К, в настоящее время основаны на оптических наблюдениях, а применение непосредственного контакта датчиков с плазмой практически невозможно из-за ее «замораживания» в месте измерения и их разрушения.

Известен также метод калориметрирования плазменной струи, который даёт возможность оценить мощность теплового излучения плазменной струи, но не позволяет определить ее температуру.

В настоящей работе предложен метод идентификации температуры струи плазмы на срезе сопла атмосферного плазмотрона с использованием решения граничной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ).

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРАНИЧНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Граничная обратная задача теплопроводности решалась, основываясь на следующих допущениях:

- тепловой поток в образце одномерный;
- теплофизические свойства материала образца постоянны;
- известна временная зависимость температуры $f(t)$ на омываемой плазмой поверхности образца с координатой $x = \delta$;
- известна временная зависимость проекции градиента температуры $\varphi(t)$ на направление Ox , нормальное к тыльной поверхности образца с координатой $x = 0$, обращенной к окружающей среде.

В этом случае граничной обратной задаче теплопроводности соответствует двухточечная задача Коши, включающая в себя:

- уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \quad (t = a\tau > 0), \quad (1)$$

- функцию теплотехнического сглаживания зависимости температуры тыльной поверхности образца (в точке $x = 0$) от времени t

$$T(0,t) = f(t), \quad t > 0, \quad (2)$$

- проекцию градиента температуры в $x = 0$

$$\left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \varphi(t), \quad t > 0. \quad (3)$$

В нашем случае при проведении экспериментов тыльная поверхность образца была теплоизолирована, так что проекция градиента температуры принималась равной нулю, т.е. $\varphi(t) = 0$ в месте ($x = 0$) измерения температуры $f(t)$.

При аппроксимации зависимости температуры тыльной поверхности подложки $f(t)$ от времени полиномиальными рядами вида

$$f(t) = \sum_{k=0}^n a_k t^k, \quad (4)$$

решение ОЗТ таково:

$$T(x,t) = \sum_{k=0}^n a_k \left[\sum_{i=1}^{k+1} \frac{k! t^{(k-i+1)} x^{(2i-2)}}{(k-i+1)!(2i-2)!} \right], \quad (5)$$

где $t = a\tau$ и τ – приведённое время и время, отсчитанное от начала нагревания в секундах; $a = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности; λ , c и ρ – теплопроводность, удельная теплоёмкость и плотность материала образца-вставки соответственно, x – координата точки в образце-вставке, отсчитанная от её тыльной поверхности [3].

Теплофизические свойства материала теплоприемника – медной вставки толщиной $\delta = 0,0035$ м, изготовленной из меди марки М1, принимались постоянными и равными:

$$c = 398 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}, \quad \rho = 8920 \text{ кг/м}^3,$$

$$\lambda = 370 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}.$$

В ходе решения ряда тестовых граничных ОЗТ было выявлено, что использование количества членов ряда аппроксимирующей функции $f(t)$ более трёх не даёт заметного уточнения результатов.

Температура T_w омываемой плазмой поверхности образца-вставки, которая в дальнейшем будет называться также и теплоприемником, определялась при подстановке в формулу (5) значения координаты $x = \delta$:

$$T_w = T|_{x=\delta} = \sum_{k=0}^n a_k \left[\sum_{i=1}^{k+1} \frac{k! t^{(k-i+1)} \delta^{(2i-2)}}{(k-i+1)!(2i-2)!} \right]. \quad (6)$$

Плотность теплового потока q_w в омываемую плазмой поверхность теплоприемника ($x = 0$) определялась с привлечением формулы (5) и гипотезы Фурье как

$$\begin{aligned} q_w &= -\lambda \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \\ &= -\lambda \sum_{k=1}^n a_k \left[\sum_{i=2}^{k+1} \frac{k! t^{k-i+1} \delta^{2i-3}}{(k-i+1)!(2i-3)!} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Предложенный метод определения температуры плазмы был верифицирован решением серии прямых задач нестационарной теплопроводности, результаты которых служили входными данными для соответствующих им граничных ОЗТ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ

Измерения проводились на плазменной установке с атмосферным плазматроном ПУН-1. В нем деталь, формировавшая плазменную струю на выходе из плазматрона и обеспечивавшая ввод напыляемого порошкообразного материала, была заменена на изготовленный из меди марки М1 вставку-теплоприемник (рис. 1 и 2).

Прорези во вставке были сделаны для ограничения “стока теплоты” от неё к плазматрону и далее в систему охлаждения. При этом образовывается небольшой полый цилиндр – теплоприемник, соединённый с остальной частью детали перемычками-«ножками» толщиной 4 мм, на внешней поверхности которого размещались термопары.

Данная конструкция детали проектировалась с использованием предварительного моделирования тепловых процессов в среде моделирования SolidWorks при помощи приложения CosmosWorks. Моделирование производилось при следующих условиях:

- подвод теплоты осуществляется к внутренней поверхности,

- температура остальных поверхностей, соприкасающихся с плазмотроном, ограничена температурой охлаждающей его жидкости,

- все поверхности теплоприемника, кроме внутренней, омываемой плазмой, теплоизолированы, т.е. плотность теплового потока через них равна нулю.

Результаты моделирования теплового процесса по истечении 10 секунд от его начала представлены на рис. 3. Они свидетельствуют о том, что при наличии прорезей, отделяющих значительную часть теплоприёмника от плазмотрона, температура на его внешней поверхности в процессе нагрева имеет наиболее равномерное распределение и “стоком теплоты” от неё к плазмотрону, и далее в систему охлаждения, можно пренебречь.

На внешней поверхности теплоприёмника были установлены предварительно взаимно тарированные термопары, после чего поверхность детали теплоизолировалась муллитокремнеземистым войлоком МКРВ-200, поверх которого были закреплены дополнительные термопары.

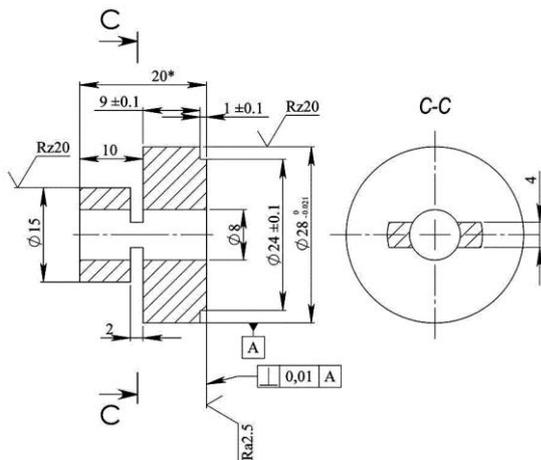


Рис. 1. Чертёж вставки из меди марки М1

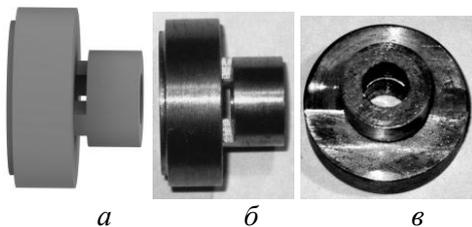


Рис. 2. Деталь «Вставка»:
 а – трехмерная модель вставки;
 б, в – фотографии вставки:
 вид спереди и сверху соответственно

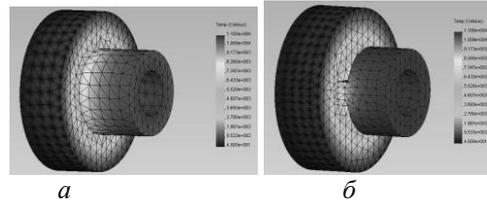


Рис. 3. Результаты моделирования тепловых процессов в детали «Вставка»:
 а – моделирование без прорези,
 б – моделирование с прорезью

Схема установки термопар и соответствующие ей фотографии представлены на рис. 4.

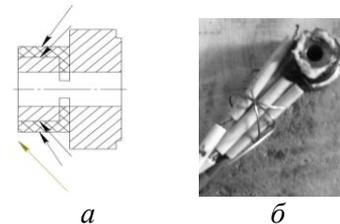


Рис. 4. Схема размещения термопар на «Вставке»: а – эскиз схемы; б – фотография детали «Вставка» с установленными термопарами

Внешний вид системы измерения данных представлен на фотографии (рис. 5), на которой показано, что модуль ICP DAS I-7018P аналогового ввода с термопар находится в теплоизолирующем боксе, в котором сохраняется равномерное температурное поле. Это было сделано для того, чтобы термокомпенсационный датчик, используемый в приборе для устранения возможных погрешностей, вносимых термо-ЭДС от холодных спаев, и непосредственно контакты термопар имели равную температуру.



Рис. 5. Система измерения данных (модуль I-7018P вынут из теплоизолирующего бокса для наглядности)

Показания термопар записывались в компьютер при помощи системы измерения данных, приведённой на рис. 6.

При проведении эксперимента использовались следующие технологические режимы установки плазменного напыления ПУН:

- ток дуги плазматрона $I = 200$ А,
- напряжение дуги $U = 200$ В,
- плазмообразующий газ - воздух,
- давление плазмообразующего газа $p = 800$ кПа,
- объемный расход плазмообразующего газа $V = 3,5$ л/с.

Эксперименты по идентификации температуры плазмы проводились следующим образом. Одновременно с запуском плазматрона включалась запись данных на компьютер, которая производилась с интервалом в 0,2 с. Это связано с тем, что модуль ICP DAS I-7018P имеет частоту 8 выборок в секунду по всем каналам.

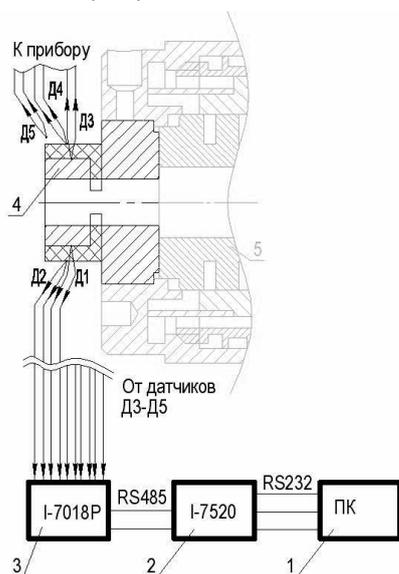


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 – компьютер, 2 – прибор ICP DAS I-7520 – преобразователь интерфейса RS-232 в RS-485 серии 7000, 3 – модуль ICP DAS I-7018P аналогового ввода данных с термопар, 4 – деталь-вставка с теплоизоляцией, 5 – плазматрон, Д1–Д5 – термопары

По истечении 10 с на внутренних термопарах температура достигала значений свыше 1070 К, после чего рост температуры прекращался. Плазматрон отключался и переходил в режим интенсивного охлаждения плазмообразующим газом, прекращалась и запись показаний термопар. Однако мониторинг температур продолжался для определения момента времени, пока вся установка не вернется к исходной (комнатной) температуре. После этого эксперимент повторялся еще два раза. Экспериментально было установлено, что материал теплоприемника, прилегающий к его внутренней поверхности, не расплавлялся, так как идентифициро-

ванная температура T_w всегда была ниже температуры плавления меди марки М1, равной 1356,15 К. На рис. 7 приведены данные измерения температуры на тыльной поверхности теплоприемника (нижние кривые) и идентифицированные температуры T_w на омываемой плазмой поверхности (верхние кривые), полученные для одной из серий опытов.

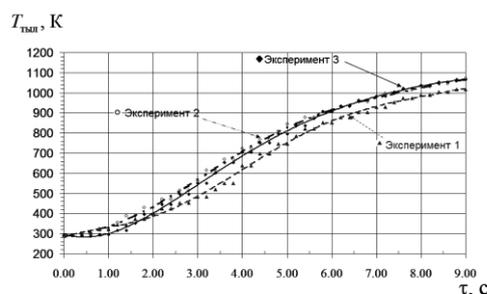


Рис. 7. Изменение температуры тыльной поверхности теплоприёмника

Из рассмотрения экспериментальных данных следует отметить, что на некоторых участках временного интервала изменения температуры ее рост достигал 150 К в секунду. По этой причине без использования современного оборудования и ввода данных в компьютер невозможно с высокой точностью выявить зависимость температуры $f(t)$ от времени.

Для расчёта температуры T_w и плотности теплового потока q_w на внутренней поверхности вставки теплоприёмника, омываемой плазмой, как это было указано ранее, использовалось решение (5) граничной ОЗТ (1)–(3). Следует отметить, что аппроксимация экспериментальных данных по измеренным значениям температуры тыльной поверхности для аналитического представления функции $f(t)$ по формуле (4) производилась полиномом 4-й степени по приведенному времени $t = a\tau$, которое принимало значения порядка 10^{-4} . Поэтому было достаточно сложно с высокой точностью аппроксимировать приведённую на рис. 7 временную зависимость для этой температуры. На рис. 8 и 9 представлены временные зависимости для температур теплоприемника, и для плотности теплового потока q_w через поверхность, омываемую плазмой, соответственно, полученные в результате аналитического решения граничной ОЗТ, т. е. по формулам (6) и (7). Линии на рис. 8 относятся к температуре поверхности теплоприёмника со стороны плазмы – 1 и на тыльной поверхности – 2.

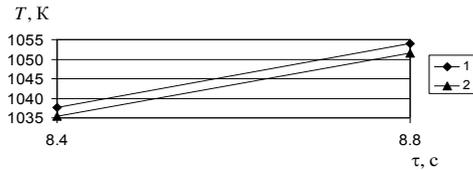


Рис. 8. Изменение во времени температур на малом отрезке времени измерения.

Полученные значения температуры T_w и плотности теплового потока q_w использовались для идентификации температуры плазменной струи на выходе их сопла плазмотрона.

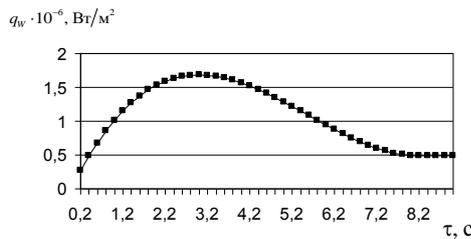


Рис. 9. Изменение во времени плотности теплового потока через омываемую плазмой поверхность теплоприёмника

Для этого температура плазменной струи T_Γ идентифицировалась с привлечением известной формулы (например, [4])

$$q_w = \frac{\epsilon_w + 1}{2} \cdot \epsilon_\Gamma \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_\Gamma}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right], \quad (8)$$

где (кроме обозначенного ранее) ϵ_w – степень черноты поверхности теплоприемника из меди, ϵ_Γ – суммарная полусферическая степень черноты плазмы воздуха, заимствованная из справочника [5], C_0 постоянная Больцмана, равная $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Из формулы (8) при идентифицированных из решения ОЗТ значений q_w и T_w и выбранных ϵ_w и ϵ_Γ находим искомую температуру плазменной струи T_Γ в виде зависимости:

$$T_\Gamma = 100 \left[\frac{2q_w}{(\epsilon_w + 1) \cdot \epsilon_\Gamma \cdot C_0} + \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]^{1/4}. \quad (9)$$

Результаты таких расчетов для одной из серии экспериментов представлены на рис. 10.

Искомое значение T_Γ устанавливается при этом в итерационном процессе, так как степень черноты плазмы ϵ_Γ при фиксированном давлении и длине пути излучения является функцией от искомой температуры.

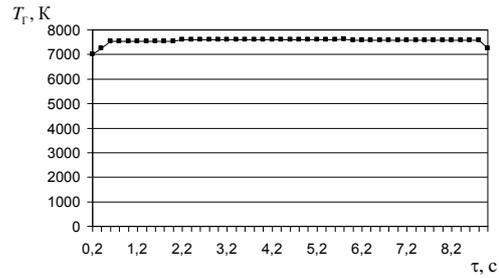


Рис. 10. Временная зависимость температуры плазменной струи

Отметим, во-первых, что вклад конвективного теплообмена на q_w составляет величину порядка 10^{-3} , и во-вторых, что приведенные на рис. 10 результаты согласуются с данными других исследователей (например, [2]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и исследован метод идентификации температуры плазменной струи на срезе сопла атмосферного плазмотрона. Он основан на использовании аналитического решения граничной обратной задачи теплопроводности с привлечением соответствующих экспериментальных данных на неомываемой плазмой поверхности теплоприемника.

Идентифицированные по предложенному методу значения температуры плазменной струи на срезе сопла атмосферного плазмотрона хорошо согласуются с данными других исследователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свенчанский А. Д.** Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева. М.: Энергоиздат, 1981. 235 с. [A. D. Svechanskiy, *Electric industrial furnaces. Arc furnaces and installations of special heating*, (in Russian). Moscow: Energoizdat, 1981.]
2. **Бугаенко Л. Т., Кузьмин М. Г., Полак Л. С.** Химия высоких энергий. М.: Химия, 1988. 368 с. [L. T. Bugaenko, M. G. Kuzmin, and L. S. Polak, *Chemistry of high energy*, (in Russian). Moscow: Khimiya, 1988.]
3. **Цирельман Н. М.** Прямые и обратные задачи тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 2005. 392 с. [N. M. Tsirelman, *Straight lines and return problems of a heat mass transfer*, (in Russian). Moscow: Energoatomizdat, 2005.]
4. **Цирельман Н. М.** Теория и прикладные задачи тепломассопереноса. М.: Машиностроение, 2005. 503 с. [N. M. Tsirelman, *Theory and applied problems of a heat mass transfer*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2005.]
5. **Оптические свойства горячего воздуха** / Под ред. Л. М. Бибермана. М.: Наука, 1970. 253 с. [*Optical properties of hot air*, Under the editorship of L. M. Biberman. Moscow: Nauka, 1970.]

ОБ АВТОРАХ

ГАРЕЕВ Руслан Радикович, асп. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инж. технол. машиностроения (УГАТУ, 2003).

ЦИРЕЛЬМАН Наум Моисеевич, проф. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инж.-мех. (ОТИПХП, Одесса, 1963). Д-р техн. наук (КГТУ им. Туполева, 1995). Числ.-аналит. и эксперим. иссл. в обл. ТМО.

METADATA

Title: Identification of plasma jet temperature using inverse heat transfer problem solution

Authors: R.R. Gareev and N. M. Tsirelman.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ruslangr@yandex.ru, at-t@ugatu.ac.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 2 (63), pp. 25-30, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The method of air plasma jet temperature identification on the edge of the atmospheric plasmotron nozzle was offered and tested. For the first time for this purposes the solution of the boundary inverse heat transfer problem was used employing the experimental data of heat receiver body surface which is not in contact with plasma. Plasma jet temperature identified on the edge of the atmospheric plasmotron nozzle by the proposed method is in a good agreement with the data of other researchers.

Key words: plasma jet temperature; contact measurement method; inverse heat transfer problem; atmospheric plasmatron.

About authors:

GAREEV, Ruslan Radikovich, PhD student, Dept. of aviation and power plants thermal engineering. Production technology engineer (USATU, 2003).

TSIRELMAN, Naum Moiseyevich Prof., Dept. of aviation and power plants thermal engineering. Mechanical engineer (ОТИПХП, Odessa, 1963). Dr. Tech. Sciences (KSTU. Tupolev, 1995). Numerical, analytical and experimental research in heat mass transfer area.