

УДК 537.523

Д-р техн. наук С. П. Поляков, І. І. Фенько, А. В. Йовченко

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ГАЗОВОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПЛАЗМОВОГО СТРУМЕНЮ ЛІНІЙНИМ ТА ЕНТАЛЬПІЙНИМ КАЛОРИМЕТРИЧНИМИ ЗОНДАМИ

Розроблена методика забезпечує безперервну реєстрацію зондами теплового потоку плазмового струменю стаціонарним проточним калориметром при перетині струменю за перерізом. Визначені технічні умови реєстрації та вимоги до конструктивних особливостей зонду. Проаналізовані результати вимірювання газової температури плазми методами лінійного та ентальпійного калориметричних зондів та встановлені похибки вимірювання, які знаходяться в межах 5...12 %.

Ключові слова: плазмотрон, плазмовий струмінь, лінійний калориметричний зонд, ентальпійний калориметричний зонд, газова температура.

Вступ

У технології плазмової обробки матеріалів газова температура плазми є важливим параметром теплообміну плазмового струменя зі стінкою плазмотрону. Для визначення газової температури на практиці частіше за все використовуються спектральні, калориметричні та електронні методи. Найбільш поширеним і зручним є калориметричний метод [1–4], який забезпечує точність визначення температури газового потоку плазмового струменя на рівні 12 % і застосовується в умовах, коли використання інших методів, або є незручним, або взагалі неможливим, наприклад, у запиленних плазмових струменях.

Сьогодні, для підвищення якості плазмової обробки, постає завдання створення методики, яка б дозволила визначати газову температуру у газовому струмені безперервно, з більшою точністю, дослідити прикатодні процеси у плазмотроні, підійти до вирішення проблеми ерозії плазмотрона.

Мета роботи

Розробка методики вимірювання температури газового потоку плазмового струменю лінійним та ентальпійним калориметричними зондами.

Обладнання та матеріали

Калориметричні зонди, які застосовувались у роботі, виготовлялися з тонкостінних мідних трубок діаметром 1 і 2 мм. Рівномірне переміщення зондів у струмені здійснювалося координатним пристроєм з реверсивним електродвигуном постійного струму. Ступінь нагрівання охолоджуючої зонд води вимірювалася мідно-константановою термопарою, виготовленою з дротиків діаметром 0,12 мм і реєструвалася швидкодіючим електронним потенціометром ЕПП-09М3. Час пробігу всієї шкали цього приладу 1 с, що відповідало в розглянутих умовах $\tau_1 \approx 10^{-2}$ с.

При переміщенні ентальпійного датчика в струмені витрати відсмоктаного газу змінювати не довелося, оскільки заміри радіального розподілу витрати газу в самому струмені, виконані за допомогою нестационарної трубки Піто, в даних умовах показали, що в межах похибки експерименту ця витрата по радіусу плазмового струменя не змінюється.

При переміщенні ентальпійного датчика в струмені витрати відсмоктаного газу змінювати не довелося, оскільки заміри радіального розподілу витрати газу в самому струмені, виконані за допомогою нестационарної трубки Піто, в даних умовах показали, що в межах похибки експерименту ця витрата по радіусу плазмового струменя не змінюється.

Отримані результати та їх обговорення

Було проведено порівняння результатів вимірювання газової температури плазми в умовах повітряного плазмового струменя методами ентальпійного [1, 2] та лінійного калориметричного зондів [3].

Теорія, конструкції і результати застосування таких зондів описано в роботах [1–4]. Автори цих робіт проводили реєстрацію теплового потоку до зонду в кожній точці струменя окремо, в той час як безперервна реєстрація цієї величини значно скорочує час проведення експерименту, забезпечує постійність умов його виконання та спрощує обробку результатів.

Здійснення такої безперервної реєстрації теплового потоку до калориметричного зонду пов'язано з виконанням ряду вимог, які висуваються до конструкції самого зонду та усієї реєструючої апаратури.

Для з'ясування цих вимог розглянемо процес безперервної реєстрації теплового потоку лінійним калориметричним зондом, який рухається перпендикулярно вісі плазмового струменя зі швидкістю n_1 . При малій швидкості течії води n_2 , яка охолоджує зонд, можливе виникнення спотворення поперечного розподілу теп-

лового потоку, що реєструється зондом, оскільки за час руху води в ньому сам зонд переміститься в іншу область струменя (спрацьовування іншої реєструючої апаратури вважаємо миттєвим). Введемо апроксимацію радіального розподілу газової температури T в плазмовому струмені у вигляді кусково-лінійної функції:

$$\begin{cases} T = T_0, & 0 \leq r \leq R/2 \\ T = 2T_0(1 - r/R), & R/2 \leq r \leq R, \end{cases}$$

де T_0 та R – температура на вісі струменя та його радіус відповідно.

Інтервал Δr між точками такого розподілу, які знаходяться на ділянці $R/2-R$, за умови, що різниця температур у них складає 1 % від температури на вісі струменя, дорівнює:

$$\Delta r = R/200.$$

За час проходження зондом цієї ділянки вода, що охолоджує зонд, повинна пройти відстань $\geq 2R$. Звідси:

$$v_2 \geq 400v_1.$$

Тепер визначимо умови, яким повинна задовольняти конструкція термопар при реєструванні нагріву охолоджуючої зонд води. Згідно з прийнятими раніше вимогам, за час проходження зондом інтервалу Δr термопара повинна встигнути відреагувати на зміну температури води, що відповідає зміні температури плазми на цьому інтервалі (1 % від температури на вісі струменя). Процес нагрівання термопар в потоці води при малих значеннях критерію Біо можна описати рівнянням:

$$mc \frac{dt_1}{dt} = \alpha(t_2 - t_1)S,$$

де m , S – маса та площа поверхні «гарячого» спаю термопар, який знаходиться в потоці;

c – теплоємність матеріалу термопар, α – коефіцієнт теплопередачі від води до спаю;

t_1, t_2 – температура спаю та води, що охолоджує зонд відповідно.

Розв'язуючи це рівняння при умові $\Delta t_1 \approx 0,96\Delta t_2$ [5], знаходимо:

$$\tau_0 = \rho r_0 c / \alpha, \tag{1}$$

де τ_0 – постійна часу нагрівання термопар, r_0, ρ – радіус спаю та густина матеріалу термопар.

Зв'язок часу встановлення τ_0 та швидкості течії охолоджуючої води виражається залежністю:

$$v_2 \leq 2R / \tau_0. \tag{2}$$

Швидкість переміщення зонду повинна задовольняти співвідношенню:

$$v_1 \leq R / 200\tau_0. \tag{3}$$

Прилад для реєстрації напруги термопар повинен мати час встановлення показників:

$$\tau_1 \leq \tau_0. \tag{4}$$

Усі отримані співвідношення справедливі не тільки для випадку лінійного калориметричного зонду, але й для ентальпійного датчика з підвищеною чутливістю [4], оскільки швидкість газу у внутрішній трубці цього датчика в умовах плазмових струменів набагато більша швидкості течії охолоджуючої води і тому не входить у співвідношення, що одержано вище.

Сумарна похибка визначення ентальпії плазми лінійним калориметричним зондом при відповідній обробці експериментальних даних [4] становить $\approx 12\%$. Для ентальпійного датчика вона менша і не перевищує 10% [5]. Однак, його не можна застосовувати в умовах запилених плазмових струменів, оскільки це веде до спотворення результатів вимірювань і виходу зонду з ладу. Застосування ж лінійного калориметричного зонду в таких умовах є цілком можливе. Не можна не врахувати також, що його конструкція і система реєстрації є менш складною, ніж у випадку застосування ентальпійного датчика.

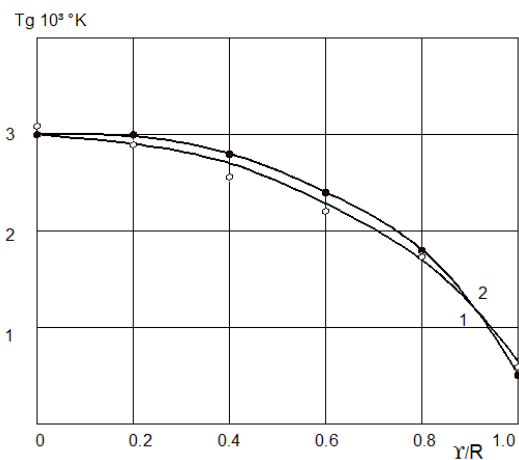
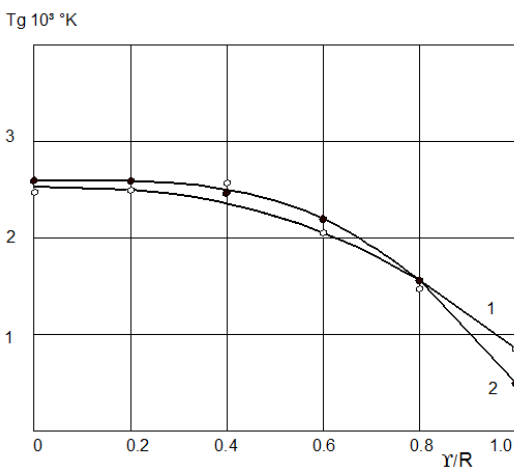


Рис. 1. Радіальні розподілення газової температури в повітряному плазмовому струмені:

a – на відстані 20 мм від зрізу сопла плазмотрона, b – 40 мм; 1 – ентальпійний датчик, 2 – лінійний калориметричний зонд

В експерименті були отримані радіальні розподіли газової температури в повітряному плазмовому струмені без добавок на відстанях 20 та 40 мм. від зрізу сопла плазмотрона потужністю до 35 кВт. Ці розподіли, отримані вказаними методами, показані на рисунку. Розкид значень температури плазми, виміряної за допомогою обох методів, знаходиться в межах їх похибок і не перевищує 5 % майже по всьому перетину струменя, збільшуючись тільки в її периферійних областях.

Висновки

Розроблена методика дозволяє:

1. При відповідному виборі реєструючого приладу, конструкції калориметричного зонда, термопари, швидкостей переміщення зонда в плазмовому струмені й течії охолоджувальної води проводити реєстрацію теплового потоку зондом не за окремими точками, а безперервно.

2. У вісесиметричних плазмових струменях з домішкою твердої фази використовувати лінійний калориметричний зонд з ентальпійним датчиком з підвищеною чутливістю. Похибка вимірювання складає 5...12 %.

Список літератури

1. Физика и техника низкотемпературной плазмы / под ред. С. В. Дресвина. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с.
2. Грей. Калориметрический зонд для измерения очень высоких температур. Приборы для научных исследований / Грей, Джекобс, Шерман. – 1982. – № 7. – 29 с.
3. Петров М. Д. Использование малогабаритного зонда для определения профилей температуры и полного давления в плотном газовом потоке. Теплофизика высоких температур / Петров М. Д., Сепп В. А. – 1980. – № 4. – 68 с.
4. Поляков С. П. О температуре частиц порошка в плазменных струях // Физ. и хим. обработка материалов / Поляков С. П., Твердохлебов В. И. – 1974. – № 6.
5. Туричин А. М. Электрические изменения неэлектрических величин. – М.-Л. : Энергия, 1976. – 275 с.
6. Клубникин В. С. Теплофизические измерения в плазменных струях / Клубникин В. С., Дресвин С. В. – Уч. зап. ЛГПИИ им. А. И. Герцена, 384, вып. 2. «Низкотемпературная плазма», 1968. – 46 с.
7. Поляков С. П. Вдосконалення технології плазмового напилювання шляхом визначення середньомасової температури частинок напилюваного матеріалу // Вісник Черкаського державного технологічного університету / Поляков С. П., Фенько І. І., Йовченко А. В. – 2013. – № 1. – С. 64–66.

Одержано 24.12.2013

Поляков С.П., Фенько И.И., Йовченко А.В. Методика измерения газовой температуры плазменной струи линейным и энтальпийным калориметрическими зондами

Разработанная методика обеспечивает непрерывную регистрацию зондами теплового потока плазменной струи стационарным проточным калориметром при пересечении струи по сечению. Определены технические условия регистрации и требования к конструктивным особенностям зонда. Проанализированы результаты измерения газовой температуры плазмы методами линейного и энтальпийного калориметрических зондов и установлены погрешности измерения, которые находятся в пределах 5...12 %.

Ключевые слова: плазмотрон, плазменная струя, линейный калориметрический зонд, энтальпийный калориметрический зонд, газовая температура.

Polyakov S., Fenko I., Yovchenko A. Method measurement of gas temperature plasma jet line and enthalpy calorimetric probe

The method that provides continuous registration of the heat flow probes plasma jet stationary flow by a calorimeter in crossing the stream cross section is developed. The specifications and requirements for peculiarities of the probe are defined. The results of measuring the plasma temperature by linear and enthalpy calorimetric probes methods and errors are within 5...12 %.

Key words: plasma torch, plasma jet, the linear calorimetric probe, enthalpy calorimetric probe, gas temperature.