Литература

1. Bachmann P. et al. // Ext. Abstracts-Diamond and Diamond like Materials Synthesis. MRS Spring Meeting, Reno (Nevada), 1988. P. 99.

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

Бублиевский Д.А.[*)], *Каролинский В.Г.*[**)], *Сазонов М.И.*[**)]
[*)] Институт тепло- и массообмена АН Беларуси
[**)] *Брестский политехнический институт*

Одним из существенных результатов длительных и целенаправленных исследований электрических дуг в электродуговых нагревателях газа (плазмотронах) стала разработка различных экспериментальных и теоретических методов определения их характеристик. Эти исследования отражены в ряде монографий, посвященных данной теме, например, в [1,2]. Подобные работы отличаются двумя проблемными особенностями. Первая из них связана с тем, что определение характеристик теоретическими, в частности, численными методами производится, как правило, в физических переменных, хотя использование обобщенных переменных позволяет сократить их количество, найти скрытые связи между ними и привести расчеты в определенную систему. Существует лишь эмпирическое реше-ние этого вопроса, требующее большого числа экспериментальных дан-ных. Вторая особенность заключается в отсутствии комплексного под-хода, направленного на установление взаимосвязи между параметрами плазменных струй и потоков, с одной стороны, и характеристиками дуги, с другой.

Некоторые предложения по решению затронутой проблемы в случае сильноточных малорасходных электрических дуг рассмотрены ниже.

В работе [3] разработана так называемая анизотропная модель электрической дуги в канале, позволившая аналитическим путем получить критериальные выражения для расчета ее характеристик. Она основана на использовании степенной аппроксимации зависимости электропроводности σ от приращения "потенциала" теплопроводнос-ти ΔS с различными показателями степеней для продольной и попереч-ной составляющих этого приращения, появляющихся при разделении переменных. Допускается $C_p/\lambda = \text{const}$, $\rho V_z = \text{const}$.

Поле "потенциала" теплопроводности в электропроводной зоне согласно [3] описывается критериальным выражением

$$\overline{\Delta S}_1(\bar r,\bar z)=\left\{\frac{\mathrm{Po}}{10{,}6k_\sigma \bar r_*^2(1+0{,}17\mathrm{K}_Q\bar r_*^2)}\times\right.$$

$$\left.\times\left[1-\exp\left(-\frac{5{,}78(n_\sigma+1)(1+0{,}17\mathrm{K}_Q\bar r_*^2)}{\mathrm{Pe}\bar r_*^2}\bar z\right)\right]\right\}^{\frac{1}{n_\sigma+1}} J_0\left(\mu_1\frac{\bar r}{\bar r_*}\right) \qquad (1)$$

Радиус электропроводной зоны определяется из неявного трансцендентного уравнения.

Частные случаи $\bar z/\mathrm{Pe}\bar r_*^2\to\infty$, $\alpha_n^2\bar z/\mathrm{Pe}\to\infty$ (асимптотическая область) и $\bar z/\mathrm{Pe}\bar r_*^2<<1$, $\alpha_n^2\bar z/\mathrm{Pe}<<1$ (начальная область) рассмотрены в [4-6]. В предельном случае $\bar z/\mathrm{Pe}\bar r_*^2\to\infty$, $\alpha_n^2 z/\mathrm{Pe}\to\infty$ радиус электропроводной зоны определяется по формуле [4]

$$\bar r_*=\exp\left[\left(-0.8\mathrm{K}_S\left(\frac{\mathrm{Po}}{10{,}6k_\sigma \bar r_*^2(1+0{,}17\mathrm{K}_Q\bar r_*^2)}\right)^{-\frac{1}{n_\sigma+1}}\right]\right. \qquad (2)$$

Рассмотрим подробнее переходную область. Полученные в [3] общее расчетные зависимости применительно к данной области можно упростить. Для этого принимаем, что радиус электропроводной зоны здесь не зависит от $\bar z$ и равен радиусу дуги в асимптотической области согласно (2). Еще более простая ситуация возникает, если этот радиус в нулевом приближении принять равным единице, что имеет место при больших значениях Po. На выходе из канала дуга занимает практически все сечение и осредненный "потенциал" можно определять, к примеру, по несколько видоизмененной формуле (1), не учитывая вклад неэлектропроводной зоны.

При решении задач в области струйного течения принимаются те же упрощения и допущения, которые использовались в дуговой области. Кроме того, в отличие от предыдущего, пренебрегается излучением и рассматривается плоская струя. Естественно, отсутствует источник джоулевого тепловыделения. Тогда уравнение энергии для струи будет иметь достаточно простой вид

$$\frac{\partial\overline{\Delta S}}{\partial\bar z}=\frac{1}{\mathrm{Pe}}\frac{\partial\overline{\Delta S}}{\partial\bar x^2} \qquad (3)$$

Оно аналогично рассматриваемым в [5] уравнениям теплопроводности при решении задач для полубесконечных твердых тел. Подобная аналогия используется в [7] при расчете газовых факелов методом эквивалентной задачи теплопроводности.

Решение (3) при условиях

$$\overline{\Delta S}(0,\bar{x}) = \begin{cases} \overline{\Delta S}_L = \text{const} & \text{при } 0 \le \bar{x} \le 1, \\ 0 & \text{при } 1 \le \bar{x} \le \infty \end{cases} \quad (4)$$

можно записать в форме [7,8]

$$\overline{\Delta S} = \frac{\overline{\Delta S}_L}{2}\left(\operatorname{erf}\frac{\bar{x}+1}{2\sqrt{\frac{\bar{z}}{\mathrm{Pe}}}} - \operatorname{erf}\frac{\bar{x}-1}{2\sqrt{\frac{\bar{z}}{\mathrm{Pe}}}}\right) \quad (5)$$

При $\bar{x} = 0$ получим закон изменения $\overline{\Delta S}$ на оси

$$\overline{\Delta S}_{00} = \overline{\Delta S}_L \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{\frac{\bar{z}}{\mathrm{Pe}}}}\right) \quad (6)$$

Определив $\overline{\Delta S}_L$ из (1), используя то обстоятельство, что при $\bar{r}_* \approx 1$ и бесселевом профиле осредненное по радиусу значение $\overline{\Delta S}$ в 2,32 раза меньше $\overline{\Delta S}$ на оси, и подставив его в (6), окончательно получим

$$\overline{\Delta S}_{00} = \frac{1}{2{,}32}\left\{\frac{\mathrm{Po}}{10{,}6k_\sigma(1+0{,}17\mathrm{K}_Q)}\times\right.$$

$$\left.\times\left[1-\exp\left(-\frac{5{,}78(n_\sigma+1)(1+0{,}17\mathrm{K}_Q)}{\mathrm{Pe}}\bar{L}\right)\right]\right\}^{\frac{1}{n_\sigma+1}} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{\frac{\bar{z}}{\mathrm{Pe}}}}\right) \quad (7)$$

Такую же подстановку можно сделать и в (5).

Таким образом, в результате данного исследования предложена аналитическая методика расчета полей температуры плазменных струй, используемых в технологиях поверхностной обработки материалов. Методика основана на модельных представлениях, позволяющих связать параметры струи с характеристиками сильноточных малорасходных электрических дуг в плазмотронах. Расчетные зависимости получены в критериальном виде.

Обозначения

C_p - изобарная теплоемкость; σ - электропроводность; λ - теплопроводность; r - плотность; V - скорость; G - расход газа; T - температура; E - напряженность электрического поля; I - сила тока; r, z, x – радиальная, продольная и поперечная координаты; R - радиус канала; Q - плотность объемного излучения; $S=\int_0^T \lambda dT$ - "потенциал" теплопроводности; $\bar{r} = r/R$; $\bar{z} = z/R$; $\bar{x} = x/R$; $\bar{L} = L/R$; $\Delta S = S - S_*$; $\overline{\Delta S} = \Delta S/\Delta S_0$; J_0 - функция Бесселя; $\mathrm{Po} = I^2/R^2 s_0 \Delta S_0$ - критерий Померанцева; $\mathrm{Pe} = GC_{p0}/\pi R\lambda_0$ - модифицированный критерий Пекле; $K_Q = Q_0 R^2/\Delta S_0$ - критерий излучения; $K_S = -\Delta S1/\Delta S_0$ - параметрический критерий; ns, ks - постоянные; μ_1, α_n - корни характеристических уравнений. Индексы: $*$ - граница электропроводной зоны; 0 - определяющее значение; 00 - осевое значение; I - электропроводная зона, z - осевая составляющая; L - относится к выходному сечению электрода.

Литература

1. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). – М.: Наука, 1973. – 232 с.
2. Теория термической электродуговой плазмы. Ч.1. Методы математического исследования плазмы / Жуков М.Ф., Урюков Б.А., Энгельшт В.С. и др. – Новосибирск: Наука, 1987. – 288 с.
3. Баблиевский А.Ф. Анизотропная модель излучающей электрической дуги // ИФЖ. – 1995. –Т.68, №5. – С. 820-826.

ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН В СТЕРЖНЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Акимов В.А., Прусова А.В.

Белорусская государственная политехническая академия

Наличие граничных поверхностей даже одного семейства (упругий слой) оказывает значительное влияние на структуру волнового поля. Если граничные поверхности принадлежат разным семействам, то картина распространения волн существенно усложняется. Простейшим примером та-