

MODELING OF SYMMETRICAL STRAINLY-DEFORM STATE OF TWO PLATE BODY COMPOUND JOINTED AT THE RIGHT ANGLE WITH GREEN'S TYPE MATRIX

Задача о статическом деформировании составного тела решается с использованием специально построенных матриц типа Грина. На примере составного тела из двух пластин при специальных краевых условиях продемонстрирована эффективность метода расчета.

Ключевые слова: статическое деформирование, матрицы типа Грина, составное тело из двух пластин, специальные краевые условия.

The problem of compound body static deformation is solved with use of specially constructed Green's type matrix. The calculation method effectiveness had been shown for the compound body with two plates with special border conditions.

Key words: static deformation, Green's type matrix, two plate body compound, special border conditions.

УДК 519.63:533.9.07

Е. В. Цегельник, канд. физ.-мат. наук Е. К. Островский, В. О. Гарин
Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ЗАТВОР АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ИСТОЧНИКАХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ – ПЛАЗМОТРОНАХ

Проведено математическое моделирование процесса молекулярной диффузии атмосферного воздуха во встречном потоке защитного инертного газа на участке газодинамического затвора в канале слива плазмы из плазмотрона. Показано, что при массовом расходе инертного газа аргон, вплоть до 10^{-3} кг/с, течение в канале остается ламинарным. Установлено, что основным источником поступления отравляющего катода атмосферного воздуха в плазмотрон является его диффузия во встречном потоке инертного газа в сливном канале плазмы на участке газодинамического затвора атмосферного воздуха. Наиболее интенсивно молекулярная диффузия воздуха происходит в пограничном слое у стенок сливного канала плазмы, который на своем начальном участке выполняет функции газодинамического затвора.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, катод, термоэлектронная эмиссия, дуговой разряд, газовый поток, ламинарное течение, плазмотрон.

Введение

В промышленности высокоразвитых стран отмечается тенденция к расширению применения плазмотронов как источников низкотемпературной плазмы. Разработаны технологии получения чистых металлов и сплавов при прямом восстановлении их из руд и рудных концентратов, при подогреве в ходе выпечной обработки и разливе металлов [1, 2].

Особенностью плазмотронов, работающих в металлургии в условиях интенсивного испарения металлов с поверхности расплавов, является необходимость использования малых рабочих напряжений, исключающих появление неуправляемых пробоев. Такой режим

работы возможно реализовать только в низковольтном сильноточном дуговом разряде [3].

Большая мощность в таком разряде достигается за счет больших токов электронной эмиссии с развитой поверхности в полой катоде. Такие токи возможно реализовать переходом от электрической дуги с пятном на катоде к диффузному равномерно распределенному разряду по всей поверхности катода. Это возможно реализовать выбором как Фомы катода (полый катод), так и переходу к новому классу «горячих» высокотемпературных электродов – термоэмиссионным катодам с малой работой выхода электрона $\phi = 2,0 \dots 2,4$ эВ в диапазоне температур 1200...1600 К [4].

Результаты исследования и их обсуждение

В исследуемом дуговом плазмотроне с выбросом низкотемпературной плазмы в атмосферу для защиты термоэмиссионного катода от отравления атмосферным воздухом используется газодинамический затвор, роль которого выполняет поток защитного и одновременно плазмообразующего инертного газа аргон (Ar), продуваемого через сливной канал плазмы плазмотрона со стороны катода. Основным источником поступления отравляющего катод атмосферного воздуха является его молекулярная диффузия во встречном потоке инертного газа на участке газодинамического затвора, расположенного в начале сливного канала плазмы. Газодинамические характеристики встречного потока аргона определяют степень отравления катода атмосферным воздухом и его ресурс [5].

Конструкция плазмотрона в разрезе приведена на рис. 1.

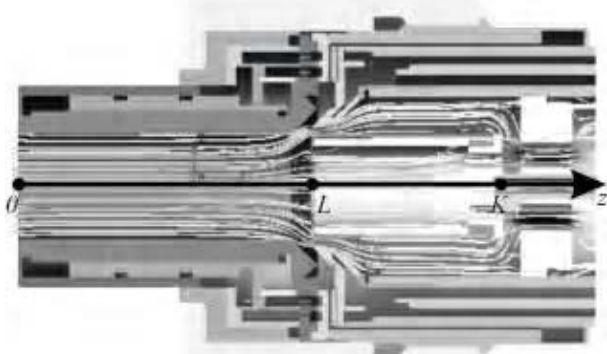


Рис. 1. Разрез плазмотрона с показом линий тока в потоке инертного газа:

0-L – газодинамический затвор; L-K – полый катод

В канале плазмотрона изображены линии газового потока, указывающие на ламинарный характер течения потока газа на участке газодинамического затвора (0-L). Картина течения получена численным моделированием течения в программном продукте *CosmosFloworks* [6]. Для цилиндрического канала ламинарный режим течения будет сохраняться при значениях числа Рейнольдса $Re < 2300$. Число Рейнольдса $Re = 2M/\pi\eta R$ зависит от массового расхода газа M [кг/с], радиуса канала плазмотрона R [м] и коэффициента вязкости Ar η_{Ar} [кг/(м·с)], который зависит от температуры [7]. Расчеты температурной зависимости числа Re для плазмотрона с $R = 0,02$ м для всех возможных температурных режимах газового потока в канале плазмотрона $T = 300 \dots 20000$ К, в диапазоне массовых расходов Ar $M = 10^{-5} \dots 10^{-3}$ кг/с показывают, что число Re не превышает своего критического значения 2300. Это указывает на то, что течение инертного газа в широком диапазоне рабочих параметров остается ламинарным.

Описание взаимной молекулярной диффузии атмосферного воздуха во встречном потоке Ar при его ламинарном течении описывается в общем случае нестационарным дифференциальным уравнением диффузии, полученного из уравнения баланса молекул воздуха в потоке инертного газа в сливном канале на участке газодинамического затвора [8]

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n_{zr}}{\partial z^2} + V_{zr} \frac{\partial n_{zr}}{\partial z}, \quad (1)$$

где n_{zr} – концентрация молекул (атомов) воздуха, как функция координат z и r ; V_{zr} – скорость потока Ar, как функция координат z и r ; D – коэффициент взаимной молекулярной диффузии воздуха в аргоне.

Если распределение концентрации во времени установилось в плазмотроне $\partial n_z / \partial t = 0$, то уравнение (1) преобразуется к виду

$$\frac{d}{dz} \left(D \frac{dn_{zr}}{dz} + V_{zr} n_{zr} \right) = 0.$$

Откуда

$$D \frac{dn_{zr}}{dz} + V_{zr} n_{zr} = \text{const}. \quad (2)$$

Преобразуем запись дифференциального уравнения (2) к стандартному виду

$$n'_{zr} + P n_{zr} = Q, \quad (3)$$

где $P = V_{zr}/D$ и $\text{const}/D = Q$.

Уравнение (3) – линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Решение такого уравнения записывается в виде [8]

$$n = \left[\int Q e^{\int P dz} dz + C \right] e^{-\int P dz}. \quad (4)$$

Приближенное аналитическое решение уравнения стационарной диффузии возможно получить, если функциональные зависимости $P(zr)$ и $Q(zr)$ в уравнении (4) заменить их средними постоянными значениями \bar{P} и \bar{Q} на длине интегрирования 0-L в газодинамическом затворе.

После подстановки \bar{P} и \bar{Q} и интегрирования уравнения (4) решение преобразуется

$$n = n' + C e^{-\bar{P}z},$$

где $n' = \text{const}/V$ – концентрация молекул воздуха в инертном газе.

По ГОСТ 10157-79 на промышленный жидкий и газообразный инертный газ Ar концентрация примесей атмосферных газов n' колеблется в пределах

$10^{21} \dots 10^{22} \text{ м}^{-3}$ в зависимости от сорта Аг.

Определим константу интегрирования C в последнем уравнении из начальных условий. При $z = 0$, $n = n_0 = 2,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ – концентрация молекул воздуха при нормальных условиях атмосферы на выходе сливного канала плазмотрона, тогда $C = n_0 - n'$. Учитывая, что $n_0 \gg n'$ и $C = n_0$ уравнение (4) запишется в виде

$$n = n' + n_0 \exp\left(-\frac{\bar{V}}{D} z\right). \quad (5)$$

Умножая на kT уравнение (5) перейдем к записи решения через парциальное давление воздуха в среде аргон + воздух

$$P = P' + P_0 \exp\left(-\frac{\bar{V}}{D} z\right). \quad (6)$$

Эксперименты, как и теоретические расчеты, указывают на наличие значительного градиента температуры в поперечном сечении в потоке нагретого газа и плазмы в канале слива плазмы [9].

В пристеночной области охлаждаемого сливного канала плазмы, где $r/R = 0,8..1$, температура в потоке Аг $600 \dots 3000 \text{ К}$ и диффузия атмосферного воздуха в сторону катода проходит в молекулярном состоянии. В горячей зоне, вблизи оси потока, где $r/R = 0 \dots 0,8$, температура газа $3000 \dots 25000 \text{ К}$. При такой температуре происходит полная диссоциация газовых молекул воздуха. В центре потока имеет место также концентрационная диффузия, но только атомов азота, кислорода и углекислого газа.

Входящий в уравнение (6) коэффициент взаимной диффузии записывается в виде

$$D = \frac{(kT)^2 (m_{Ar} + m_g)}{\pi m_{Ar} m_g P (r_{Ar} + r_g)^2 \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu_g} + \frac{8RT}{\pi \mu_{Ar}}}}, \quad (7)$$

где для недиссоциированного воздуха: $m_g = 49 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ – средняя масса молекулы воздуха, $r_g = 1,82 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ – средний радиус молекул воздуха, $\mu_g = 0,029 \text{ кг/моль}$ – молярная масса молекулярного воздуха; для диссоциированного воздуха: $m_g = 25 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ – средняя масса атома воздуха, $r_g = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ – средний радиус атома воздуха, $\mu_g = 0,0145 \text{ кг/моль}$ – молярная масса атомарного воздуха; $m_{Ar} = 67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ – масса атома Аг, $r_{Ar} = 1,83 \cdot 10^{-10} \text{ кг}$ – радиус атома Аг $\mu_{Ar} = 0,040 \text{ кг/моль}$ – молярная масса Аг; $P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – давление в кана-

ле; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана; $R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ – газовая постоянная; T – температура газа.

Температурные зависимости коэффициента взаимной диффузии для диссоциированного атомарного и молекулярного воздуха при ламинарном течении газа представлены на рис. 2.

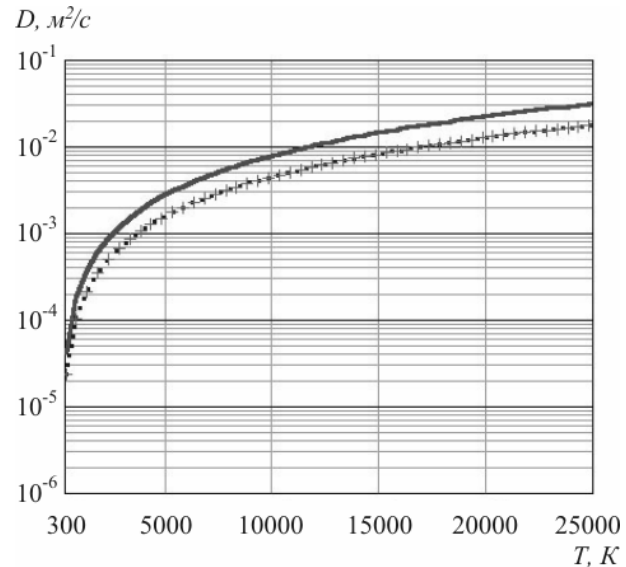


Рис. 2. Зависимость коэффициента взаимной диффузии атомарного и молекулярного воздуха в аргоне от температуры при $P = 10^5 \text{ Па}$:
 — атомарный кислород, ••• молекулярный кислород,
 +++ молекулярный воздух

Как следует из графиков коэффициенты взаимной диффузии для диссоциированного атомарного и молекулярного воздуха отличаются в 1,5 раза в рабочем диапазоне температуры газа $300 \dots 25000 \text{ К}$. Наибольшее изменение D наблюдается в диапазоне температуры $300 \dots 5000 \text{ К}$, т.е. в пристеночной области сливного канала в плазмотроне.

В длинных каналах слива плазмы, длиной более $7 \dots 8 \text{ см}$, и небольших массовых расходах вязкого инертного газа, менее 10^{-3} кг/с , в канале устанавливается ламинарное течение. Распределение скоростей по радиусу в таком потоке описывается формулой Хагеля-Пуазейля

$$V = \frac{2M}{\pi r R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (8)$$

где M – массовый расход инертного газа, R – радиус сливного канала на участке газодинамического затвора, ρ – плотность газа.

В установившемся ламинарном течении в сливном канале продольная скорость не зависит от продольной координаты z , что позволяет принять ее как постоянную \bar{V} в уравнении (5).

Среднее уравнение коэффициента диффузии \bar{D} в том же уравнении (5) находится для каждого значения отношений r/R как среднее арифметическое значений D на расстояниях z от торца газодинамического затвора в направлении к катоду плазмотрона.

Решение уравнения (6) с граничным условием по воздуху $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па позволило рассчитать распределение парциального давления атмосферного воздуха в потоке инертного газа Ar в сечениях $z = 0,6 \dots 0,9$ м от торца газодинамического затвора в направлении к катоду плазмотрона.

В пристеночном пограничном слое, где $r = (0,8 \dots 1)R$, расчет проведен для молекулярного воздуха. В ядре дуги, где $r = (0 \dots 0,8)R$ – для осредненных параметров диссоциированного воздуха в атомном состоянии. Распределение парциального давления воздуха в поперечных сечениях сливного канала на участке газодинамического затвора, представленное на рис. 3, указывает на решающую роль продольной концентрационной диффузии воздуха у стенок газодинамического затвора в сливном канале плазмотрона на проникновение натекания его с торца плазмотрона в область катода.

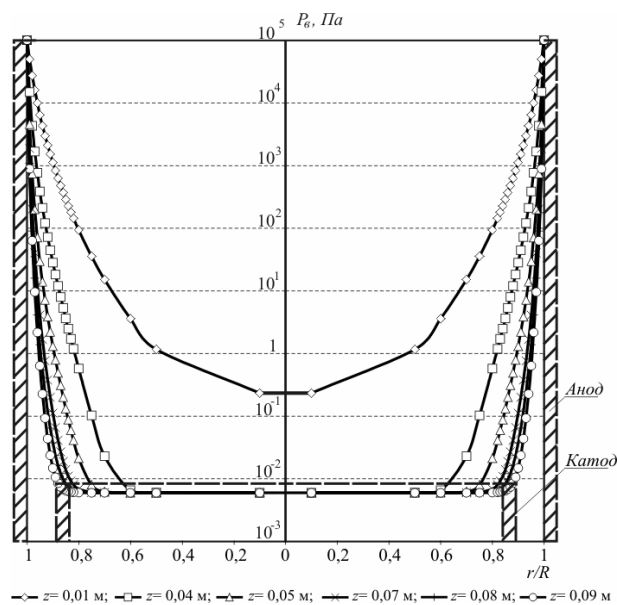


Рис. 3. Распределение парциального давления атмосферного воздуха в разных сечениях канала плазмотрона

Предельно допустимое парциальное давление атмосферного воздуха в область расположения термоэмиссионного катода, установлено в работе [5] и равно $P_{e\text{lim}} = 1 \cdot 10^{-2}$ Па. Учитывая, что по основным компонентам воздуха и парам воды в составе плазмообразующего инертного газа Ar технической очистки парциальное давление равно $P = 0,6 \cdot 10^{-2}$ Па, то допустимая диффузионная добавка не должна превышать $P_{e\text{доб}} = 0,4 \cdot 10^{-2}$ Па.

Выбор длины канала газодинамического затвора z в плазмотроне с термоэмиссионным катодом определяется из условия, что парциальное давление диффундирующего отравляющего атмосферного воздуха не должно превышать предельного значения $P_{np} = 0,4 \cdot 10^{-2}$ Па на расстоянии z в месте расположения катода в плазмотроне.

Из результатов расчета (рис. 3) следует, что эффективно защищен от отравления лишь центр катода, где скорость встречного потока инертного газа максимальна. Хуже защищены участки катода по периферии при $r/R > 0,8$. Эти участки катода попадают в пристеночный пограничный слой в потоке защитного инертного газа, где скорость течения, согласно уравнения (8), мала. Для усиления защиты катода по периферии длина газодинамического затвора должна быть увеличена до значения $z \geq 0,9$ м.

Заключение

1. Методами математического и компьютерного моделирования уравнений газодинамики исследовано течение плазмообразующего инертного газа аргон в плазмотроне
2. Установлен ламинарный характер течения аргона на участке газодинамического затвора вплоть до расхода аргона $M = 10^{-3}$ кг/с.
3. Изучен вклад продольной взаимной диффузии отравляющих катод атмосферных газов через встречный ламинарный поток плазмообразующего инертного газа аргон в общее парциальное давление атмосферы в области катода.
4. Проведенные расчеты подтверждают, что основной диффузионный поток атмосферы в сторону термоэмиссионного катода формируется у стенок сливного канала плазмотрона на участке газодинамического затвора, где скорость потока аргона $V_{zr} = 0$.

Перечень ссылок

1. Мельник Г. А. Перспективы использования плазменных источников теплоты в агрегатах внепечной обработки стали / Г. А. Мельник, О. С. Забарило, А. А. Ждановский и др. // Проблемы специальной электротехнологии. – 1991. – Вып. 2. – С. 60–66.
2. Жадкевич М. Л. Создание и освоение плазменного ковша-печи / М. Л. Жадкевич, Г. А. Мельник, О. С. Забарило и др. // Проблемы специальной электротехнологии. – 1998. – Вып. 1. – С. 42–49.
3. Плазменная металлургия / Цветков Ю. В., Николаев А. В., Панфилов С. А. и др. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1992. – 265 с. – (Низкотемпературная плазма. Т. 8).
4. Кривцов В. С. Проблемы создания высокоресурсных сильноточных электродуговых плазмотронов / В. С. Кривцов, С. И. Планковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 7 (23). – С. 7–21.

5. Кривцов В.С. Состав газа в плазмотроне с ламинарным потоком плазмообразующего инертного газа / В. С. Кривцов, С. И. Планковский, Е. В. Цегельник, Е. К. Островский, А. А. Таран, А. В. Лоян // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 4 (20). – С. 19–24.
6. Планковский С. И. Методика расчета основных газодинамических параметров потока инертного газа в плазмотроне / С. И. Планковский, Е. В. Цегельник, Е. К. Островский, В. А. Максименко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 7 (43). – С. 94–98.
7. Ваграфтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Ваграфтик. – М. : Наука, 1972. – 721 с.
8. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математикера / М. Я. Выгодский. – М. : Наука, 1977. – 872 с.
9. Жуков М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. – М. : Наука, 1973. – 232 с.

Одержано 01.10.2009

E. V. Tsegelnyk, E. K. Ostrovsky, V. O. Garin

A GAS-DYNAMIC SHUTTER OF ATMOSPHERIC AIR IN LOW TEMPERATURE PLASMA SOURCES - PLASMATRONS

Проведено математичне моделювання процесу молекулярної дифузії атмосферного повітря в зустрічному потоці захисного інертного газу на ділянці газодинамічного затвору в каналі викиду плазми із плазмотрона. Показано, що при масовій витраті інертного газу аргон, аж до 10^{-3} кг/с, течія у каналі залишається ламінарною. Встановлено, що основним джерелом надходження атмосферного повітря в плазмотрон, яке отрує катод, є його дифузія в зустрічному потоці інертного газу в зливному каналі плазми на ділянці газодинамічного затвору атмосферного повітря. Найбільш інтенсивно молекулярна дифузія повітря відбувається в прикордонному шарі біля стінок зливного каналу плазми, що на своїй початковій ділянці виконує функції газодинамічного затвору.

Ключові слова: низькотемпературна плазма, катод, термоелектронна емісія, дуговий розряд, газовий потік, ламінарна течія, плазмотрон.

The mathematical modeling of atmospheric air's molecular diffusion process in oncoming rare gas stream on the gas-dynamic lock region of the plasmatron is carried out. It is shown, that during the rare gas's argon mass-consumption up to 10^{-3} kg/s, the laminar flow in channel remains. It was determined, that the main source of an atmospheric air's entry in the plasmatron is the air's diffusion in oncoming rare gas stream on the gas-dynamic lock region. The molecular air diffusion takes place with the most intensity in the boundary layer near the walls of the confluent plasma's channel, which is the above mentioned gas-dynamical lock.

Key words: low temperature plasma, cathode, termo-electrical emission, arc digit, gas stream, laminar flow, plasmatron.

УДК 621.793

П. И. Можаяев, канд. техн. наук Е. Я. Швец, д-р техн. наук В. Н. Михайлин,
Л. Л. Веревкин, канд. техн. наук Н. В. Светанько

Государственная инженерная академия, г. Запорожье

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОЦИНКОВЫХ ФАЗ В ДИФфуЗИОННЫХ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЯХ

Предложен новый метод расчета эффективности экранирования железоцинковых фаз в термодиффузионных цинковых покрытиях от электромагнитного излучения.

Ключевые слова: железоцинковые фазы, диффузия, ферромагнетик, диамагнетик, бинарная система, гомогенность, эвтектоидное превращение.

Анализ достижений

Диффузионное цинковое покрытие, полученное в расплаве цинка, состоит из нескольких железоцинко-

вых фаз и слоя почти чистого цинка. При этом строение покрытия повторяется даже при самой кратковременной выдержке стали в расплаве цинка.