

Веремейчик А. И., Сазонов М. И., Хвисевич В. М.

ПЛАЗМОТРОН С ГАФНИЕВЫМ КАТОДОМ ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Введение. Плазменные технологии широко используются при сварке, резке и упрочнении металлов, нанесении износостойких тонких пленок на детали машин, в металлургии, химической промышленности и многих других процессах. Одним из широко распространенных промышленных способов получения плазмы является применение плазмотронов постоянного тока, в которых горит электрическая дуга в потоке рабочего газа. Увеличение мощности и ресурса работы плазмотронов в значительной мере определяется успехами в изучении эрозии электродов в области приэлектродных участков дуги [1, 2]. Эрозия катода возникает вследствие сложных тепловых, электрических, химических и механических процессов в приэлектродной области. Эти процессы до сих пор в достаточной мере не изучены. Основной упор в большинстве исследований по эрозии делается на экспериментальное изучение явлений и эмпирическое обобщение опытных данных для того, чтобы в дальнейшем создать обоснованную математическую модель и найти рациональные методы расчета оптимальных конструкций катодов [1–6].

При повышении мощности плазмотронов за счет увеличения тока следует иметь в виду, что скорость эрозии примерно пропорциональна току. Одним из путей снижения скорости эрозии является использование коаксиальных плазмотронов, плазмотронов с вихревой стабилизацией, в которых приэлектродные участки дуги перемещаются с большими скоростями вдоль поверхности электродов под действием аэродинамических или электромагнитных сил. Основным фактором, определяющим скорость эрозии, является удельный тепловой поток в катод. Для термоэмиссионных электродов он, как правило, превышает 50 кВт/см^2 и зависит от рода рабочего газа, силы тока, характера охлаждения электрода и других факторов.

Методика исследований и некоторые результаты. Цирконий и гафний применяют в установках для резки в среде воздуха или кислорода, работающих в условиях повторно-кратковременного режима [3]. В качестве рабочего материала катода плазмотрона наиболее распространение получил вольфрам, активированный окисями тория, лантана, бария, калия и другими веществами, внесение которых значительно снижает работу выхода электронов из металла и улучшает тем самым его эмиссионную способность при высоких температурах. Однако гафний является более перспективным материалом благодаря более низкой скорости его испарения, более высоким температурами плавления и кипения (2222°C и 5400°C для гафния против 1850°C и 3577°C для вольфрама соответственно), большей величиной термоэмиссии двуокиси гафния, образующейся на поверхности катода в результате взаимодействия гафния с кислородом воздуха, а также большей допускаемой величиной действующего в пятне теплового потока.

При проведении исследований в качестве исходного материала для катодов служил гафний йодидный марки ГФИ-1, который затем переплавляли в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере аргона. Из слитков механической обработки получали катоды диаметром 2,5 мм и длиной 10–12 мм.

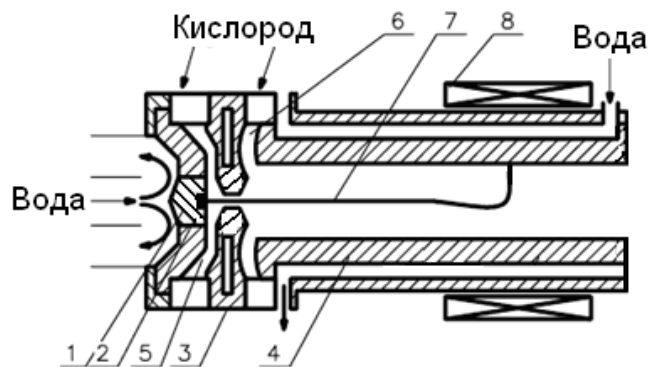
Для исследования эрозии вольфрамового катода и тепловых потерь в него разработан экспериментальный плазмотрон, схема которого приведена на рисунке 1. Плазмотрон состоит из гафниевых катода 1, впаиваемого в медную обойму 2, поджигающего электрода 3 с минимальным внутренним диаметром 6 мм и медного анода 4 (цельного или составного) ступенчатой геометрии. Рабочий и стабилизирующие газы подавались с закруткой соответственно в

вихревые камеры 6 и 5, что обеспечивало как стабильность положения столба дуги на оси электродов, так и катодного пятна, что, в свою очередь, повышало точность определения диаметра пятна и плотности тока на катоде. Стабилизирующим дугу на катоде газом служил кислород, рабочим газом – воздух с расходами 0,4–1 г/с и 30–50 г/с соответственно. Охлаждение электродов и межэлектродной вставки осуществлялось водой.

Гафниевый стержень впаивался в медную обойму серебряным припоем в вакууме. Межэлектродную вставку применяли для стабилизации катодного пятна дуги на гафниевом стержне, устраняя пробой в межэлектродном промежутке. С этой целью в вихревую камеру подавали небольшой расход воздуха $(0,4 - 1) \frac{\text{г}}{\text{с}}$ с закруткой.

Поджиг дуги производился осциллятором между катодом и межэлектродной вставкой, которая на время запуска электрически подключалась к аноду.

Электропитание установки осуществлялось от генератора постоянного тока с номинальным напряжением 750 В, причем напряжение на дуге составляло 500–600 В. Основную величину δ (глубина кратера в катоде) измеряли при помощи микроскопа.



1 – гафниевый катод, 2 – медная обойма, 3 – поджигающий электрод, 4 – выходной медный анод, 5 – вихревая камера стабилизирующего дугу защитного газа, 6 – вихревая камера рабочего газа, 7 – дуга, 8 – соленоид

Рисунок 1 – Схема установки для исследования эрозии гафниевых катодов

При конструировании катодных узлов плазмотрона необходимо знать тепловые потоки в катод. Для отыскания путей снижения скорости разрушения катода исследован тепловой поток в него. Основная доля тепловой энергии, равная $I_i(U_k + U_i - \varphi)$, передается в катод ионами. Потеря тепла катодом в приэлектродной области происходит в основном за счет термоэмиссии электронов и выражается величиной $I_{\text{ф}}$. Кроме того, теплообмен в области катода происходит излучением нагретой поверхности катода и высокотемпературного газа дуги, конвективным теплообменом, испарением материала катода и т. д. Вклад этих слагаемых в тепловой поток обозначим через Q . Величину теплового потока от дуги в катод Q_k определим по формуле [1]:

Веремейчик Андрей Иванович, к. физ.-мат. н., доцент, старший научный сотрудник испытательного центра; e-mail: vai_mirtm@tut.by.

Сазонов Михаил Иванович, д. т. н., профессор, профессор кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

Хвисевич Виталий Михайлович, к. т. н., доцент, профессор кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета; e-mail: vmhvisevich@bstu.by.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.



Рисунок 2 – Внешний вид катода

$$Q_k = I_i (U_k + U_i - \varphi) - I_i \varphi + Q$$

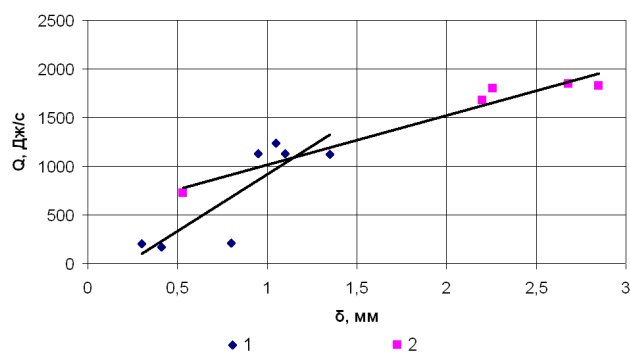
$$\text{или } Q_k = I [s(U_k + U_i) - \varphi] + Q, \quad (1)$$

где I – ток дуги, s – доля ионного тока, U_k – катодное падение потенциала, U_i – потенциал ионизации дуги, φ – работа выхода электронов. Из уравнения (1) видно, что при увеличении тока дуги возрастает тепловой поток Q_k .

Согласно [4], катодное падение потенциала в воздушной и кислородной дуге при больших токах равно $9 \pm 2 В$. С целью определения s и Q , влияния на величину теплового потока условий отвода тепла от места привязки дуги были проведены тепловые измерения в диапазоне изменения токов до 300 А при диаметре стержней до

3 мм и различных интенсивностях их охлаждения. Установлено, что в исследованном диапазоне токов зависимость $Q = f(I)$ можно описать линейной функцией тока. Из сравнения величин теплового потока для различных диаметров стержней следует, что для таких катодов тепловой поток не зависит от интенсивности охлаждения стержня и его диаметра. Полученные данные по тепловым потокам в катод подтверждают, что основными прикатодными процессами, определяющими энергетический баланс на катоде, являются передача тепла ионами и термоэмиссия электронов.

На рисунке 3 приведена зависимость теплового потока в катод от глубины кратера. С ростом δ тепловой поток возрастает от 700 до 1850 Дж/сек при увеличении глубины кратера от 0,3 до 3 мм. По-видимому, возрастание теплового потока в катод связано с тем, что с ростом δ увеличивается доля тепла, отдаваемая в катод от участка столба дуги в кратере.



1 – $d_c = 2,5$ мм; 2 – $d_c = 3$ мм

Рисунок 3 – Зависимость теплового потока в катод от глубины кратера при токе дуги 300 А

Потеря материала катода определялась путем его взвешивания до и после эксперимента, причем время непрерывной работы плазматрона и величина потерь материала катода выбирались такими, чтобы удельная эрозия могла быть определена с точностью 10–20 %. В силу этого время испытаний варьировалось от 10 минут до 3 часов в зависимости от тока дуги.

Эрозия гафниевого катода при рассматриваемой конструкции креп-

ления стержня минимальна в том случае, если диаметр этого стержня будет равен диаметру катодного пятна d_k . Катодное пятно на гафнии, покрытом слоем соединений, не имеет внутренних причин к перемещению [4] и представляет концентрированную тепловую нагрузку.

Экспериментально найдено, что при токе 300 А и диаметре гафниевого стержня $d_c = 2,5$ мм диаметр катодного пятна составляет 2,3–2,4 мм, при этом плотность тока на катоде равна $(5 \div 8) \cdot 10^{-3} \frac{А}{см^2}$.

Ресурсные испытания гафниевых катодов проводились при токах 300–500 А длительностью 6 ч. Скорость выгорания катода в течение первых 10–60 мин равна 1 мм/ч. Высокая первоначальная скорость выгорания катода связана с образованием окисно-нитридной пленки на катоде и установлением температурного режима.

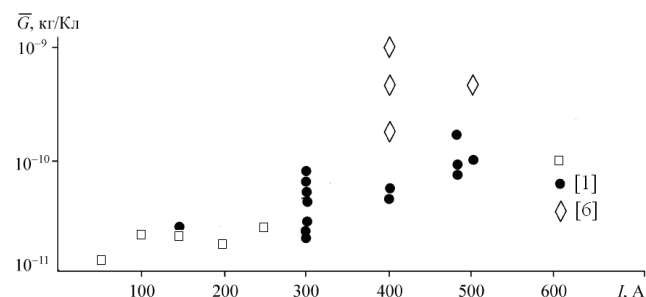


Рисунок 4 – Зависимость удельной эрозии гафниевых катодов от тока дуги

При работе установки в течение следующих 1–3 ч наблюдается снижение эрозии до 0,3 мм/ч. Средняя скорость выгорания катода составила 0,44 мм/ч, следовательно, величина удельной эрозии

$$\bar{G} = (2 \div 3) \cdot 10^{-8} \frac{э}{А \cdot с}, \text{ что соответствует } 40\text{--}45 \text{ ч непрерывной}$$

работе гафниевого катода при токе 300 А. Таким образом, гафний может быть рекомендован для использования его в качестве катода при работе в стационарном режиме.

Заключение. Генераторы низкотемпературной плазмы кислорода находят все более широкое применение в машиностроении при дуговой резке специальных сталей и плазменной обработке, в химической промышленности, например, в производстве TiO₂ и т. д. Проведены исследования тепловых потоков в катод, особенности формирования зоны привязки дуги к катоду. Определена зависимость диаметра этой зоны от тока и глубина выгорания в процессе работы плазматрона. Применение плазматронов в значительной мере определяется их непрерывной длительностью работы – ресурсом работы электродов, их эрозией. Проведены исследования возможности увеличения ресурса работы плазматрона путем применения в качестве материала внутреннего электрода – термохимического гафниевого катода.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование термохимических катодов в дуговых плазматронах / А. С. Аньшаков [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 4. – С. 685–691.
2. Туманов, Ю. Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах / Ю. Н. Туманов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 968 с.
3. Быховский, Д. Г. Плазменная резка / Д. Г. Быховский, А. Я. Медведев, И. М. Костылев. – М.: Информстандартэлектро, 1968. – С. 8.
4. Бричкин, А. В. К динамике электродных пятен электрической дуги / А. В. Бричкин, А. В. Болотов, Т. В. Борисова // ЖТФ. – 1966. – № 7. – С. 301.
5. Жуков, М. Ф. Термохимические катоды / М. Ф. Жуков, А. В. Пустогаров. – Новосибирск: Ин-т теплофиз. СО АН СССР, 1982. – 157 с.
6. Болотов, А. В. Термохимический катод: конструкция и работа / А. В. Болотов, Т. В. Борисова // Тр. 4-й Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата, 1970. – С. 268–271.

The article presents theoretical and experimental studies of the features of the arc to the thermionic cathode and the nature of the formation of the crater with the formation of simulating electrons of the oxide layer of hafnium. The resource of operation of the thermochemical hafnium cathode of the plasma torch at currents up to 300 A with working gases oxygen and air at continuous arc combustion is studied.

УДК 539.3

Хвисевич В. М., Веремейчик А. И., Мазырка М. В.

ПОСТРОЕНИЕ СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

Введение. Современный уровень развития техники и технологий выдвигает перед инженерами требования по созданию эффективных методов расчета инженерных конструкций, позволяющих снизить материалоемкость элементов при их достаточной прочности и надежности. Основная цель таких методов – исследовать напряженно-деформированное состояние тел, а также распределение температурного поля. Для этого необходимо поставить и решить краевые задачи механики деформируемого твердого тела и в частности теории упругости, теплопроводности, термоупругости [1–5]. Во многих случаях достаточно ограничиться рассмотрением плоских областей. Немаловажным аспектом с позиции снижения материалоемкости конструктивных элементов является также учет неоднородности материала, т. е. когда характеристики материала зависят от температуры [6].

Особое применение для построения математических моделей краевых задач механики деформируемого твердого тела получила теория потенциала. Ее практическим воплощением стало появление метода граничных элементов. Длительное время в инженерной практике исследователи отдавали предпочтение методу конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). Однако ряд работ, например, [1, 5], позволил развить метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) и показал преимущества метода ГИУ перед МКР и МКЭ. Сущность метода ГИУ состоит в преобразовании дифференциальных уравнений в эквивалентную систему интегральных. Этот метод имеет характерную особенность – возможность решения задач с использованием дискретизации лишь границы области. Это позволяет снизить на единицу порядок решаемой системы алгебраических уравнений. Естественно, что реализация такой возможности в методе ГИУ предусматривает предварительный переход от исходной краевой задачи для дифференциальных уравнений, описывающих некоторый процесс, к соотношениям, связывающим неизвестные функции на границе области (или ее части).

1. Постановка задачи. При исследовании напряженно-деформированного состояния элементов механизмов и машин, строительных конструкций в случае воздействия на них высоких температур важную роль играет учет изменения коэффициента линейного расширения α от температуры T (модули упругости E и G считаются постоянными). Для решения поставленной задачи используем метод граничных интегральных уравнений [1, 2].

В работе [3] для определения $\alpha(T)$ рекомендуется использовать зависимость:

$$\alpha = \alpha_0 (1 + \gamma T), \quad (1)$$

где α_0 – значение коэффициента для исходного состояния; γ – эмпирический коэффициент.

Рассмотрим дифференциальное уравнение краевой задачи термоупругости для плоской области D в перемещениях:

$$\Delta u_i + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_0^{\alpha(T)} \alpha(T) dT, \quad i, j = 1, 2, (2)$$

с граничными условиями на границе L области D :

$$\sigma_{ij} n_j = q_i(x_L),$$

где u_i – вектор перемещений, ν – коэффициент Пуассона.

2. Построение сингулярных интегральных уравнений. Решение уравнения (2) ищем как сумму общего решения однородного дифференциального решения теории упругости u_i^U и частного решения u_i^T :

$$u_i = u_i^U + u_i^T. \quad (3)$$

Частное решение u_i^T представим в виде:

$$u_i^T = \frac{\partial W}{\partial x_i}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получим:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \Delta W = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\int_0^{\alpha(T)} \alpha(T) dT \right). \quad \text{Это уравнение удовле-}$$

творяется, если принять: $\Delta W = \frac{1+\nu}{1-\nu} \int_0^{\alpha(T)} \alpha(T) dT$.

Используя зависимость для $\alpha(T)$ (1), получаем соотношение:

$$\Delta W = a \left(T + \frac{T^2}{2} \gamma \right), \quad (5)$$

где $a = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_0$.

Предполагаем, что внутренние источники тепла отсутствуют, а коэффициент теплопроводности является функцией температуры $\lambda(T) = \lambda_0 (1 - kT)$, где k – определяется с помощью экспериментальных кривых [4], λ_0 – коэффициент теплопроводности при исходной температуре. Температурное поле T удовлетворяет уравнению теплопроводности:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = 0. \quad (6)$$

Введем функцию теплопроводности:

$$T^* = \int_0^T \lambda(T) dT. \quad (7)$$

Тогда, подставляя (7) в (6), приходим к уравнению Лапласа:

$$\Delta T^* = 0. \quad (8)$$

Функция T связана с гармонической функцией T^* неявной за-