

УДК 537.525.5

ТЕМПЕРАТУРА ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ДУГОВЫХ КАТОДОВ*А. В. Пустогаров, В. И. Завидей, О. А. Поваляев*

Определена температура поверхности дугового пятна на вольфрамовых, циркониевых и гафниевых катодах в диапазоне токов 50—200 А. Измерения проведены по естественному и поляризованному собственному излучению с помощью стороннего лазерного излучения.

Температура поверхности является одним из основных параметров, определяющих режим работы дуговых катодов. Знание ее необходимо для оценки эмиссии, эрозии, сведения баланса энергии и т. д. Ее значение может изменяться в широких пределах и достигать температуры кипения материала $T_{\text{кип}}$ (для вольфрама $T_{\text{кип}} \approx 6000$ К). В связи с экспоненциальной зависимостью термоэмиссии, испарения от температуры к точности ее определения предъявляются повышенные требования [1]. Кроме влияния экранирующего излучения плазмы, изменения состояния поверхности [2-4], в рассматриваемых условиях возможно также и превышение температуры электронов над температурой решетки [5-7].

Экспериментальная установка и методика исследования

В настоящей работе представлены результаты исследования температуры вольфрамовых катодов в среде гелия, аргона, циркониевых и гафниевых катодов — в азоте, воздухе, углекислом газе, водяном паре. При атмосферном давлении газов ток разряда изменялся в диапазоне 50—300 А.

Относительный вклад излучения плазмы в показание пирометра стационарным методом определялся из выражения (рис. 1)

$$\bar{\kappa} = E_{\text{пл}}/E_{\text{эл+пл}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{эл+пл}}$ — суммарное излучение электрод+плазма, измеряемое по оси разряда; $E_{\text{пл}}$ — излучение плазмы, измеряемое по оси (без пятна) или по нормали к оси у поверхности катода. Вклад излучения плазмы оценивался также по измерению яркостной температуры пятна (электрод+плазма) при резком прерывании тока разряда. Метод основан на том, что за время релаксации плазмы температура поверхности электрода в связи с его тепловой инерционностью не успевает снизиться на заметную величину [8]. Выделить излучение плазмы из прикатодной области данными методами не представляется возможным.

Для регистрации излучения в узких спектральных интервалах использовался быстродействующий фотоэлектрический микропирометр ПФМ-315 [9]. Диаметр площадки визирующей на электроде составлял ~ 0.1 мм, временное разрешение $\sim (10^{-7} \div 10^{-6})$ с. Для снятия поля температур на входе в оптическую систему пирометра устанавливалось сканирующее устройство. Регистрация показаний осуществлялась на электронном запоминающем осциллографе С9-8.

Для получения спектрального состава излучения ($E_{\text{эл+пл}}$, $E_{\text{пл}}$) применялся дифракционный монохроматор ИКС-31, на щель которого с помощью медного зеркала фокусировалась площадка диаметром ~ 0.1 мм из плоскости торца электрода. В спектральном интервале 0.4—1.2 мкм спектральное разрешение

составило 5 Å. Регистрация излучения осуществлялась на потенциометре ЛКС-4-003, калибровка проводилась по эталонной вольфрамовой лампе СИРШ-8.5-200. Температура нити составляла 3000 К и контролировалась пирометром ЭОП-066.

После учета вклада излучения плазмы встает вопрос о переходе от температур, измеренных методами оптической пирометрии (яркостной $T_{я}$, цветовой $T_{ц}$), к истинной T , осуществляемому с помощью монохроматической излучательной способности исследуемой поверхности ϵ_{λ} [10, 11]. В случае зеркальной поверхности дугового пятна использовался метод определения истинной температуры по поляризованному излучению. В этом случае зависимость относительной угловой спектральной яркости параллельно поляризованной компоненты излучения имеет максимум при угле к нормали $\varphi = 80^\circ$. При этом измеренная яркостная температура соответствует истинной $T_{я||}(\varphi = 80^\circ) = T$, а монохроматическая излучательная способность $\epsilon_{\lambda||}(\varphi = 80^\circ) = 1$. Данный метод апробирован на поли-

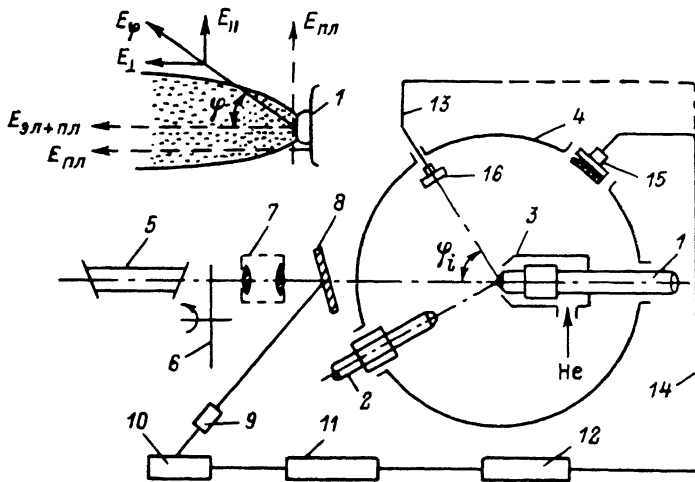


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — катод; 2 — анод; 3 — обтекатель; 4 — интегрирующая сфера; 5 — зондирующий лазер; 6 — модулятор; 7 — фокусирующая система; 8 — полупрозрачное зеркало; 9 — фотодиод; 10 — синхронный детектор; 11 — селективный усилитель; 12 — монохроматор; 13, 14 — световодные линии; 15, 16 — оптические головки.

рованном вольфраме до $T = 2100$ К [12]. В качестве реперной температуры может служить температура фазового перехода материала [8]. Из сопоставления спектрального распределения энергии излучения пятна и абсолютно черного тела также может быть получена оценка истинной температуры [13].

Наиболее перспективным представляется метод измерения с использованием стороннего лазерного излучения (метод лазерной рефлектометрии) [14, 15]. В этом случае непосредственно измеряются монохроматическая излучательная способность $\rho_{\lambda}(\epsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda})$ и яркостная температура $T_{я}$, а затем находится истинная температура T . Последняя может быть измерена и с помощью лазерного излучения в двух длинах волн [16].

В настоящей работе при определении температуры по поляризованному излучению на входе в пирометр устанавливался поляризационный светофильтр типа ПФ-32. При измерении отражательной способности ρ_{λ} (рис. 1) катод 1 и анод 2 помещались в интегрирующую сферу 4 диаметром 0,25 м с входным отверстием 5 мм. Излучение лазера ЛГ-52-1 5 с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм модулировалось обтюратором 6 с частотой от 1 до 5 кГц. Оптимальная частота модуляции выбиралась из условия минимальных помех, обусловленных неустойчивостью разряда. С помощью оптической системы 7 лазерное излучение через полупрозрачное зеркало 8 фокусировалось на исследуемую поверхность (диаметр пятна 0,1 мм). Мощность лазера контролировалась фотодиодом 9 типа ФД-10Г.

Отраженное лазерное излучение через оптическую головку 15, световодную систему 14 поступало на входную щель монохроматора ИКС-31 12. Электрический сигнал с фотоприемника монохроматора 12 подавался на селективный усилитель 11, а затем синхронно детектировался устройством с активным интегратором 10. При определении индикатрисы отражения лазерного излучения оптическая головка 16 перемещалась по полуокружности радиусом 0.35 м. Положение головки (угол φ_i) фиксировалось датчиком угловых перемещений.

Отражательная способность исследуемой поверхности находилась путем сопоставления с эталонным диффузным отражателем из окиси магния по соотношению

$$\rho_{\lambda_0}(T) = \frac{u}{u_0} \rho_{\lambda_0}^0.$$

Здесь u , u_0 — сигналы, пропорциональные отраженному излучению от исследуемой и эталонной поверхностей; $\rho_{\lambda_0}^0 = 0.98$ — отражательная способность эталона при $\lambda_0 = 0.63$ мкм [11].

Измерения проводились через 3—5 мин после зажигания разряда, когда устанавливалась стационарная температура дугового пятна, поддержание которой осуществлялось стабилизацией тока и контролировалось пирометром. Стационарные условия поддерживались в течение ~ 10 мин, пока снималось спектральное распределение яркости дугового пятна, измерялась яркостная температура, «надевалась» сфера и измерялись отражательная способность $\rho_{\lambda_0}(T)$ и индикатриса отражения. По измеренным значениям T_{π} и $\varepsilon_{\lambda_0} = 1 - \rho_{\lambda_0}$ находилась истинная температура поверхности T , а из спектрального распределения яркости по известной истинной температуре вычислялась спектральная излучательная способность.

Погрешность измерения $\rho_{\lambda_0}(T)$ обусловлена в основном дисперсией регистрируемого сигнала (см. выражение (2)) за счет флуктуации яркости свечения плазмы. Применение спектральной селекции и синхронного детектирования регистрируемого сигнала обеспечило величину отношения сигнал—шум на уровне 40 дБ при постоянной времени ~ 0.1 с. С учетом влияния плазмы погрешность измерения $\rho_{\lambda_0}(T)$ составила менее 3 % для W катода в He и 5 % для Zr и Hf катодов в N_2 , воздухе, CO_2 . Погрешность определения истинной температуры достигала ~ 2 %, а распределения монохроматической излучательной способности 11 %.

Экспериментальные результаты

Исследования показали, что в случае вольфрамовых катодов в атмосфере гелия в спектрограмме излучения $E_{\Sigma, \text{пл}}$ (рис. 1) зарегистрированы линии нейтралов He I $\lambda = 4685, 9678, 5873$ и $11\ 800$ Å; линий вольфрама не обнаружено. Вкладом излучения плазмы в спектральном интервале 0.4—1.2 мкм в показании пирометра можно пренебречь (за исключением участков со спектральными линиями He I). При работе вольфрамового электрода в режиме анода яркостная температура поверхности дугового пятна возрастает, в спектрограмме излучения $E_{\Sigma, \text{пл}}$ не зафиксировано и спектральных линий He I. Поэтому вольфрамовый анод использовался для определения оптических характеристик оплавленной поверхности дугового пятна. При использовании в качестве плазмообразующего газа Ag вклад излучения плазмы ($\lambda = 0.65$ мкм) может давать завышение измеряемой температуры на 300—500 К [9].

В случае Zr и Hf катодов относительный вклад излучения плазмы \bar{K} зависит от рода плазмообразующего газа, уровня тока. В атмосфере воздуха при повышении тока с 60 до 120 А значение \bar{K} в диапазоне 0.5—0.8 мкм возрастает приблизительно с 0.1 до 0.3, что соответствует завышению измеряемой температуры на 100—150 К. Определение вклада излучения плазмы проводилось в спектральных интервалах, свободных от спектральных линий. Спектральное распределение яркости излучения поверхности пятна лежит между яркостью излучения абсолютно черного тела при температурах 3900 и 4200 К. В атмосфере азота на длинах волн 0.85 и 1.16 мкм вклад излучения плазмы достигает 200 К. Такой же уровень излучения и плазмы CO_2 . Наиболее существенный вклад из-

лучения плазмы (300—400 К) наблюдается при работе Zr катода в парах воды [17]. Неопределенность учета вклада излучения плазмы в рассмотренных случаях не превышала 40 К, что составляет менее 1 % от измеряемой температуры.

Проведенный анализ показал, что поверхностный слой дугового пятна на Zr и Hf катодах после работы в N₂ состоит из стехиометрических нитридов ZrN, HfN, после работы в воздухе, углекислом газе, водяном паре — из оксидов ZrO₂ и HfO₂.

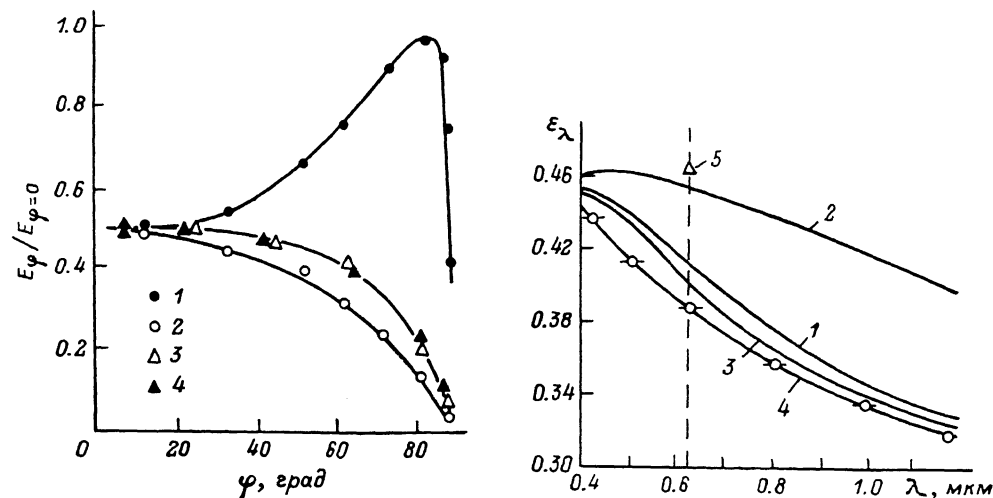


Рис. 2. Относительная угловая зависимость параллельно (1, 3) и нормально (2, 4) поляризованных компонент излучения поверхности дугового пятна.

1, 2 — W электрод в He; 3, 4 — Zr катод в N₂.

Рис. 3. Спектральная излучательная способность вольфрама.

1 — полированная поверхность, T=2800 К [21]; 2 — шероховатая (h_{ср}=1.14 мкм, T=2800 К [21]; 3 — кристаллизация расплава на электроде (T=3660 К); по поляризованному излучению; 4 — дуговое пятно (T=4200 К); по лазерному излучению; 5 — закристаллизовавшаяся поверхность электрода (T=300 К); по лазерному излучению.

Значения яркостных температур, полученные на Zr и Hf катодах в воздухе, приведены в табл. 1. Поскольку T_я ≤ T, то полученные результаты дают нижний предел истинной температуры; для Zr катода T ≥ 3790 К, для Hf катода T ≥ 4110 К. По измеренным значениям T_я вычислялась цветовая температура (двух- и трехцветовая). Определенные таким образом для Hf катода значения T_ц(λ₁, λ₂), T_ц(λ₁, λ₂, λ₃), T_ц(λ₁, λ₂, λ₃) оказались ниже T_я(λ₂), а следовательно, и истинной температуры.

Ниже представлены результаты определения истинной температуры поверхности дугового пятна по поляризованному излучению. Они показывают (рис. 2), что характер излучения оплавленной поверхности дугового пятна на вольфрамовом электроде соответствует зеркальному (относительное угловое распределение параллельно поляризованной компоненты излучения E_{||} имеет макси-

Таблица 1
Температура Hf и Zr катодов при токе 100 А

λ, мкм	T ₀ , К									
	T _я		T _ц (λ ₁ , λ ₂)		T _ц (λ ₁ , λ ₃)		T _ц (λ ₂ , λ ₃)		T _ц (λ ₁ , λ ₂ , λ ₃)	
	Hf	Zr	Hf	Zr	Hf	Zr	Hf	Zr	Hf	Zr
λ ₁ = 0.442	3930	3790	3550	4330	4030	4070	4210	3910	2400	5120
λ ₂ = 0.5	4110	3730								
λ ₃ = 0.65	3940	3640								
λ ₄ = 1.196	3220	3090								

Температура вольфрамового электрода

λ , мкм	T, K				
	$T_{я}$	$T_{я }$ ($\varphi=80^\circ$)	$T_{п}(\lambda_1, \lambda_2)$	$T_{п}(\lambda_2, \lambda_3)$	$T_{п}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$
$\lambda_1=0.442$	[3360] (4000)	[3600]	[3880]	[3780]	[3670]
$\lambda_2=0.5$	[3310] (3510)	(4400)	(4470)	(4400)	
$\lambda_3=0.65$	[3170] (3700)				
$\lambda_4=1.196$	[2750] (2850)				

Примечание. [] — в период фазового перехода, () — в дуговом пятне при $I=100$ А.

мум при $\varphi=80^\circ$, $\varepsilon_{\lambda||}=1$). В случае Zr и Hf катодов в атмосфере N_2 , воздуха, CO_2 , водяного пара наблюдается монотонное снижение величины $E_{\varphi}/E_{\varphi=0}$ с увеличением угла к нормали φ . Такой вид углового распределения поляризованных компонент характерен для незеркальных поверхностей, например графита [10]. Это исключает возможность измерения истинной температуры по поляризованному излучению, как и в случае оплавленного вольфрамового электрода.

Сопоставление результатов определения температуры поверхности дугового пятна на вольфрамовом аноде представлено в табл. 2. В процессе фазового перехода значение $T_{я||}$ ($\lambda=0.65$ мкм, $\varphi=80^\circ$) всего на 80 К ниже температуры плавления вольфрама $T_{п.1}=3660$ К, т. е. приблизительно на 2 % без учета разброса данных по $T_{п.1}$. Близкие значения дает и трехцветная температура $T_{п}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$. На основании измеренных яркостных температур (табл. 2) определена монохроматическая излучательная способность ε_{λ} в процессе фазового перехода ($T=T_{п.1}$) и в дуговом пятне при $I=100$ А (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Монохроматическая излучательная способность вольфрамового анода

λ , мкм	ε_{λ}	$T_{п}(I=0)$			$T=4400$ К ($I=100$ А)			
		0.5	0.65	1.196	0.442	0.5	0.65	1.196
0.442	0.4	0.44	0.4	0.33	0.44	0.43	0.39	0.32

На рис. 3 представлены определенные с помощью лазерного метода значения излучательной способности поверхности дугового пятна на вольфрамовом катоде (кривая 4), которые хорошо согласуются с полученными по поляризованному излучению (табл. 3). Значения излучательной способности поверхности дугового пятна лежат ниже данных для полированной поверхности при $T=2800$ К. Снятая индикатриса отражения поверхности дугового пятна говорит о зеркальном характере отражения. Это согласуется с данными по собственному поляризованному излучению (рис. 2). Поэтому можно заключить, что исследуемая оплавленная поверхность является «гладкой». Наличие шероховатости величиной порядка 1 мкм привело бы к повышению монохроматической излучательной способности (рис. 3, 2). Вне оплавленной зоны катода за счет «шероховатости» поверхности, вызванной осаждением материалов, значение ε_{λ} ($\lambda=0.63$ мкм) изменяется от 0.4 до 0.8.

В случае Zr и Hf катодов температуру фазового перехода затруднительно использовать в качестве реперной точки в связи с неопределенностью состава расплава. Наблюдаемое на Zr катоде в N_2 низкое значение $T_{я}\approx 2900$ К на плато фазового перехода может свидетельствовать о том, что в момент кристаллизации расплава его состав не соответствует стехиометрическому нитриду циркония ZrN . Надо иметь в виду, что при увеличении содержания азота в цирконии до стехиометрического состава [18] и повышении давления азота над поверхностью до 6.0 МПа [19] температура плавления материала возрастает с 2125 до 3970 К.

С другой стороны, в условиях дугового пятна наблюдается сверхравновесная растворимость газа в металле [20]. С повышением содержания азота в цирконии выше стехиометрического температура плавления будет снижаться. Кроме того, при интенсификации охлаждения дугового пятна на W, Zr и Hf катодах кристаллизация может происходить при переохлаждении расплава (плато фазового перехода $T_n = \text{const}$ отсутствует).

Значения ϵ_λ дугового пятна на Zr и Hf катодах в атмосфере N_2 снижаются с 0.92 до 0.8 с увеличением длины волны с 0.6 до 1.2 мкм. Для окислительных сред (воздух, CO_2 , H_2O) величина $\epsilon_\lambda \approx 0.9$ постоянна в диапазоне 0.6—1.2 мкм.

Заключение

При исследовании дуговых пятен на W, Zr и Hf катодах уровень температуры поверхности достигал $5 \cdot 10^3$ К, плотности тока 10^5 А/см², плотности теплового потока 10^9 Вт/м², градиента температур в глубь материала 10^5 К/см. В рассмотренных условиях не обнаружено отклонений в характере излучения исследуемой поверхности от «теплового равновесного». Оплавленная поверхность дугового пятна на W катодах является «зеркальной»; измерение истинной температуры может быть выполнено по поляризованному излучению. При переходе через температуру плавления монохроматическая излучательная способность вольфрама ϵ_λ ($\lambda = 0.65$ мкм) монотонно снижается до значения ~ 0.38 . Вне оплавленной поверхности значение ϵ_λ может изменяться в диапазоне 0.4—0.8 за счет шероховатости поверхности. Поверхность дуговых пятен на Zr и Hf катодах не является зеркальной, значения ϵ_λ ($\lambda = 0.65$ мкм) лежат в интервале 0.8—0.9. При измерении температуры поверхности дуговых пятен на Zr и Hf катодах предпочтение следует отдать яркостному, а на W катодах — цветовому методам оптической пирометрии.

Литература

- [1] Жуков М. Ф., Козлов Н. П., Пустогаров А. В. и др. Прикатодные процессы в дуговых разрядах. Новосибирск: Наука, 1982. 160 с.
- [2] Павлов В. Г., Рабинович А. А., Шредник В. Н. Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 17, № 5, с. 247—250.
- [3] Tonks L. A. Phys. Rev., 1935, v. 48, p. 562—568.
- [4] Барташюс И. Ю., Праневичюс Л. Й., Фурсей Г. Н. ЖТФ, 1974, т. 10, № 9, с. 1943—1948.
- [5] Гинзбург В. Л., Шабанский В. П. ДАН СССР, 1955, т. 100, № 3, с. 445—448.
- [6] Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходяко Ю. В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
- [7] Невский А. П. ТВТ, 1970, № 4, с. 898—899.
- [8] Пустогаров А. В., Колесниченко А. Н., Гаврюшенко Б. С. и др. ТВТ, 1973, т. 11, № 1, с. 174—179.
- [9] Пустогаров А. В. В кн.: Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука, 1977, с. 315—340.
- [10] Свет Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М., 1968. 240 с.
- [11] Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / Под ред. Шейндлина А. Е. М.: Энергия, 1974. 472 с.
- [12] Reppenhoff W. Z. Angewandte Physik, 1960, Bd 12, H. 4, S. 168—171.
- [13] Завидей В. И., Пустогаров А. В., Вертипрахов А. И. и др. ТВТ, 1983, т. 21, № 5, с. 1014—1016.
- [14] Magdeburg H., Schley U. Z. Angewandte Physik, 1966, Bd 20, H. 5, S. 465—473.
- [15] Баширин А. Ю., Кириллин А. В., Шейндлин М. А. ТВТ, 1984, т. 22, № 1, с. 131—137.
- [16] Kuz H. Instr. Phys. Conf. Ser., 1975, N 26, p. 273—277.
- [17] Пустогаров А. В., Завидей В. И., Жиенбеков Г. Р. и др. ТВТ, 1985, т. 23, № 5, с. 863—866.
- [18] Янчур В. П., Андриевский Р. А., Спивак И. И. и др. Неорг. материалы, 1969, т. 5, № 6, с. 1012—1017.
- [19] Ероньян М. А., Аварба Р. Г., Никольская Т. А. Неорг. материалы, 1976, т. 12, № 2, с. 247—249.
- [20] Дембовский В. Плазменная металлургия. М.: Металлургия, 1981. 280 с.
- [21] Thomas L. K. J. Appl. Phys., 1968, v. 39, N 10, p. 4681—4686.

Поступило в Редакцию
17 октября 1986 г.
В окончательной редакции
8 декабря 1987 г.