

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ КАТОДОВ В ОТРАЖАТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ

*В.Н. Бориско\**, *Г.П. Глазунов\*\**, *Е.В. Клочко\*\*\**, *М.В. Лотоцкий\*\*\**,  
*И.А. Рудая\**, *Ю.Ф. Шмалько\*\*\**

*\*Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина, г.Харьков, Украина*

*\*\*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г.Харьков, Украина*

*\*\*\*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г.Харьков, Украина*

Досліджені температурні режими катодів газорозрядної комірки Пенінга в умовах горіння відбивального розряду в середовищі водню. Катоди були виготовлені з гідриду багатокомпонентного сплаву на основі цирконію, або з інертного до водню металу. Показано, що при горінні розряду металогідридний катод розігривається під дією іонного бомбардування в меншій ступені, ніж інертний до водню еталонний. Це обумовлено ендотермічним тепловим ефектом розкладу металогідриду та конвективним виносом теплоти з воднем, що десорбується. В результаті біля 70% теплової потужності, яка виділяється на катоді, витрачається на генерацію плазмоутворюючого газу.

Исследованы температурные режимы катодов газоразрядной ячейки Пеннинга в условиях горения отражательного разряда в среде водорода. Катоды были изготовлены из гидрида многокомпонентного сплава на основе циркония, либо из инертного газа к водороду металла. Показано, что при горении разряда металлгидридний катод разогревается под действием ионной бомбардировки в меньшей степени, чем инертный к водороду эталонный. Это обусловлено эндотермическим тепловым эффектом разложения металлгидрида и конвективным уносом теплоты с десорбируемым водородом. В результате до 70% выделяющейся на катоде тепловой мощности расходуется на генерацию плазмообразующего газа.

The temperature modes of Penning gas-discharge cell cathodes under conditions of reflective discharge burning in hydrogen medium are investigated. The cathodes were made either of the hydride of multicomponent zirconium-based alloy, or of the metal which is inert with respect to hydrogen. It is shown that at discharge burning the metal hydride cathode is heated up under ion bombardment in lesser extent than the reference hydrogen-inert one. It is caused by endothermic heat effect of metal hydride decomposition and convective heat sink with desorbed hydrogen. As a result, up to 70% of the heat power evolved in the cathode is spent for plasma-forming gas generation.

В работах [1,2] нами было показано, что в условиях горения отражательного разряда в среде водорода, когда материалом одного из катодов газоразрядной ячейки является гидрид на основе сплава циркония, наблюдается замедление темпа роста температуры металлгидридного катода с возрастанием разрядного тока.

Данный результат имеет важное прикладное значение, открывая возможность, эффективной защиты от распыления элементов конструкции вакуумно-плазменных установок, подвергающихся интенсивной бомбардировке высокоэнергетичными частицами в вакууме [2]. Для практической реализации соответствующих технических решений необходима количественная информация о температурных режимах металлгидридных элементов, бомбардируемых высокоэнергетичными ионами. В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований по данному вопросу.

Эксперименты проводились на пеннинговской газоразрядной ячейке, один из катодов которой прессовался из композиционного материала, содер-

жащего гидридообразующий сплав состава  $Zr_{55}V_{40}Fe_5 + 3 \text{ мас. \% } B_2O_3$ , насыщенный водородом до содержания 229 нсм<sup>3</sup>/г и смешанный с медным связующим в количестве 40% от суммарной массы композита [3]. Диаметр катода составлял 20 мм, толщина 4 мм, общее количество запасенного в нем водорода составляло 2,5 ндм<sup>3</sup>. Второй, эталонный, электрод имел такие же размеры, и выполнялся из нержавеющей стали, меди, молибдена, либо был полностью идентичен первому. Детальное описание аппаратуры и методики эксперимента приведено в [1]. Температура обоих катодов измерялась введенными в них хромель-алюмелевыми термопарами, включенными в измерительную цепь по стандартной либо дифференциальной схеме.

Эксперименты проводились в стационарном режиме горения разряда при следующих внешних параметрах: падение напряжения на разряде  $U_p=(1...4)$  кВ; плотность разрядного тока  $I_p=(6...12)$  мА/см<sup>2</sup>; напряженность магнитного поля  $H_0=(0,3...1)$  кЭ; давление водорода  $P=(0,03...1,3)$  Па. Параметры плазмы определялись зондовой методикой и соста-

вили: плотность  $n_p=(3...8) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , электронная температура  $T_e=(20...60) \text{ эВ}$ . Энергетические спектры ионов, бомбардирующих катоды (рис.1), определялись электростатическим анализатором, расположенным за отверстием в катоде. Интегрирование зависимостей  $I(E)$  показало, что доля кинетической энергии бомбардирующих катод ионов составляет 65...70% от подводимой в разряд электрической мощности.

*Рис.1. Энергетические спектры ионов, бомбардирующих катод при различных характеристиках разряда:*

Характеристика Значение Кривая 1 Кривая 2 Давление, Па 0,130,065 Напряжение, кВ 1,52,0 Катодный ток, мА 4,03,8 Напряженность магнитного поля, Э400400

На рис.2 показана зависимость температуры металлогидридного катода и разности температур между катодами газоразрядной ячейки от времени экспозиции, при падении напряжения на разряде 2,5 кВ, плотности катодного тока  $5 \text{ мА/см}^2$  и давлении 0,13 Па. Из приведенных данных видно, что металлогидридный катод разогревается при горении разряда в меньшей степени, чем инертный к водороду

*Рис.2. Зависимость температуры металлогидрида (1) и разности температур между катодами (2 – металлогидрид – нержавеющая сталь, 3 – металлогидрид – металлогидрид) от времени экспозиции*

ду эталонный. Соответствующая разность температур уже через 20 мин устанавливается на уровне 80 К и остается постоянной (и практически одинаковой для различных материалов эталонного катода, кроме металлогидрида) на протяжении всего эксперимента (кривая 2). Такое поведение обусловлено эндотермическим тепловым эффектом разложения металлогидрида и конвективным уносом теплоты с десорбируемым водородом.

Разность температур между двумя металлогидридными катодами (кривая 3) незначительно (до 5 К) растет только в первые 10...15 мин экспозиции, падая затем до нуля. Причиной этого, по-видимому, является выравнивание концентраций водорода в металлогидридных катодах работающей ячейки.

Температурный режим металлогидридного катода определяется балансом между скоростью поглощения энергии бомбардирующих катод ионов, отвода тепла путем теплопроводности и теплового излучения, а также тепловым эффектом разложения металлогидрида:

$$W_i = S \cdot k_g \cdot P \cdot (T_c - T_0) + \lambda_c \cdot (T_c - T_0) + S \cdot k_u \cdot \sigma \cdot (T_c^4 - T_0^4) + Q,$$

где  $W_i$  – мощность, подводимая к катоду бомбардирующими ионами;  $S$  – площадь поверхности катода;  $k_g$  – коэффициент теплопроводности водорода;  $P$  – давление водорода;  $T_c$  – температура катода;  $T_0$  – температура стенок разрядной камеры;  $\lambda_c$  – теплопроводность катододержателя;  $k_u$  – коэффициент излучательной способности поверхности катода;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $Q$  – член, учитывающий суммарный тепловой эффект процессов образования и разложения металлогидрида.

Из уравнения теплового баланса металлогидридного катода с учетом приведенных данных (см. рис.2) следует, что 60...70% выделяющейся на катоде тепловой мощности расходуется на генерацию плазмообразующего газа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Петрушеня, В.Н. Бориско, Ю.Ф. Шмалько, Е.В. Клочко, М.В. Лотоцкий. Автостабилизированные по давлению системы газового питания вакуумно-плазменных установок с использованием обратимых геттеров водорода // *Вакуумная техника и технология*. 2000, № 1, с. 15–20.
2. Е.В. Клочко, М.В. Лотоцкий, Ю.Ф. Шмалько, В.Н. Бориско. Снижение теплонпряженности диверторных пластин при помощи металлогидридов. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* 1998, вып.5(71), с.55–57.
3. Ye.V. Klochko, M.V. Lototsky, V.V. Popov, Yu.F. Shmal'ko, V.N. Borisko. Sorption and electrotransfer characteristics of hydrogen-gettering material in contact with a hydrogen plasma // *J. Alloys and Compounds*. 1997, v.261, p.259–262.