

ВЛИЯНИЕ ВДУВА ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ В ПРИЭЛЕКТРОДНЫЙ СЛОЙ НА РЕЖИМ РАЗРЯДА ПОРИСТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ МГД-УСТРОЙСТВА

В. О. Герман, Ю. П. Кукота, Г. А. Любимов

(Москва, Киев)

Одним из методов борьбы с эрозийным и коррозионным воздействием агрессивных кислородсодержащих плазменных потоков на электроды МГД-устройств является вдув защитных газов в приэлектродный слой [1]. Задача создания эрозионностойких электродных материалов в настоящее время полностью не решена и, кроме того, существенно осложняется переходом на определенной стадии к дуговому режиму разряда [2]. Поэтому применение вдува защитных газов вызывает интерес как с точки зрения использования в агрессивной среде ряда известных металл-керамических материалов с ограниченной окислительной стойкостью, так и с точки зрения некоторых возможностей управления приэлектродными процессами.

Ряд металл-керамических материалов на базе тугоплавких карбидов и боридов (TiC , ZrB_2 , $\text{NbC} + \text{Co}$, $\text{ZrB}_2 + \text{LaB}_6$) в виде пористых ($\Pi = 30 \div 42\%$) газопроницаемых образцов [3] был испытан в качестве электродов модели МГД-канала. Использовался также графит марки ПГ-50. Рабочий поток ($T = 2600^\circ \text{K}$, $V = 350 \text{ м/сек}$) представлял собой струю воздуха, подогреваемую в плазмотроне [4], с добавкой калия (до 1,2%). Для защиты поверхности электродов использовался вдув аргона или очищенного азота (содержание $\text{O}_2 \sim 0.003\%$) через пористый материал электрода.

Известно [5], что катод МГД-устройства может работать в одном из трех режимов: распределенный разряд в режиме термоэмиссии, распределенный разряд в режиме насыщения и дуговой разряд. Данная работа посвящена влиянию вдува газов на процесс перехода к дуговому режиму.

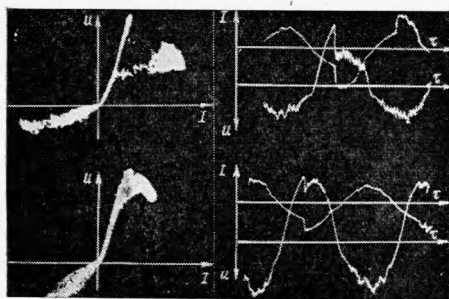
Анализ осциллограмм вольт-амперных характеристик, полученных в режиме приложенного переменного электрического поля ($f = 50 \text{ Гц}$), показывает, что для большинства материалов, испытанных без вдува, переход к дуговому режиму в условиях эксперимента наступал при значениях катодного падения потенциала $\Delta U_1^* = 30 \div 50 \text{ в}$.

В экспериментах со вдувом аргона и, особенно, азота было замечено существенное влияние подачи защитного газа на переход к дуговому разряду и вид самого разряда. На фиг. 1 приведены характерные осциллограммы для электродов из пористого графита ПГ-50, защищенного вдувом азота. Для равных температур поверхности электрода

при одинаковых значениях количества присадки $\psi = 0.4\%$ влияние нарастания вдува проявляется в виде «вырождения» дугового разряда. Промежуток времени между приведенными осциллограммами составлял $\tau = 1,5 \text{ сек}$.

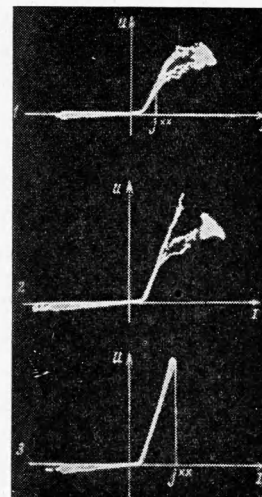
Дуговой разряд 1 по мере нарастания вдува переходит к неустойчивому разряду 2 и вообще исчезает в пределах прикладываемого напряжения 3. Сопоставление максимальных плотностей токов j^{**} , снимаемых с электрода в режиме распределенного разряда, показывает, что j^{**} для кадра 3 вдвое превышает j^{**} для кадра 1.

На фиг. 2 приведены две характерные осциллограммы для электродов из пористого карбида титана при вдуве

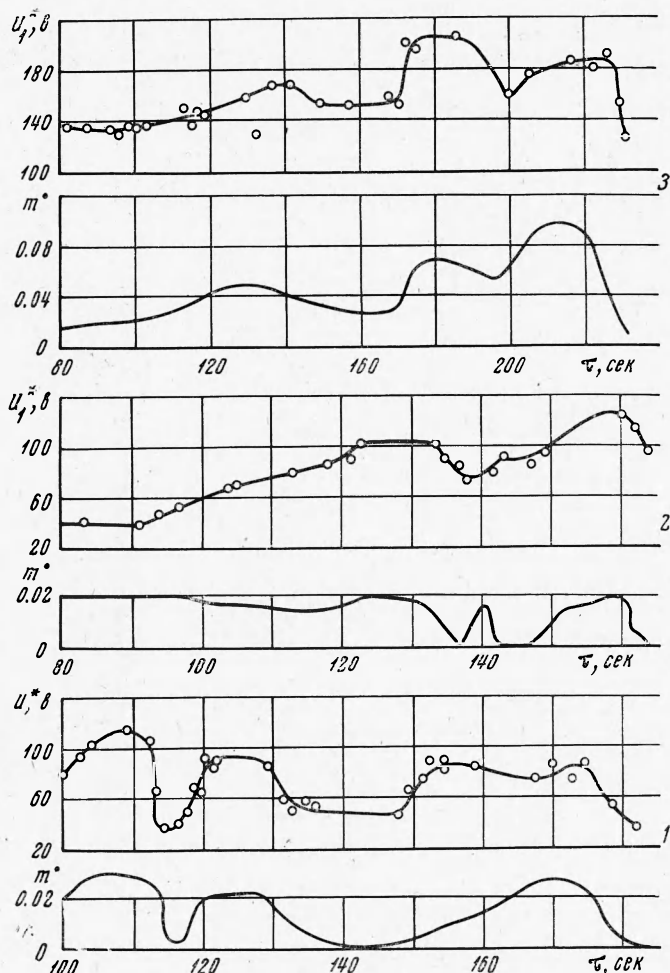


Фиг. 2

азота и соответствующие им развертки тока и напряжения в цепи электродов. Характеристики сняты при одинаковых значениях температуры и концентрации присадки при одном и том же значении приложенного напряжения $U = 150 \text{ в}$. Как известно [5], определяющими параметрами вольт-амперной характеристики в зоне дугового разряда могут быть U_1^* — напряжение пробоя и U_2^* — напряжение потухания дуги, ниже которого переход к дуговому режиму для данного материала не наблюда-



Фиг. 1



Фиг. 3

ется. Как видно, напряжение U_2^* изменяется вдвое при переходе от вдува азота, соответствующего параметру $m^* = \rho_w V_w / \rho_0 U_0 = 0.015$, к параметру вдува 0.025. Промежуток времени между кадрами 10 сек. Увеличение вдува приводит к уменьшению интенсивности дуги как по амплитуде тока, так и по падению напряжения, что видно из временных разверток тока и напряжения.

На фиг. 3 представлены зависимости U_1^* и параметра m^* вдува от времени запуска для экспериментов с графитовыми электродами при вдуве азота 1 и аргона 2 и с электродами из карбида титана при вдуве азота 3. Можно видеть, что значения U_1^* следуют характеру изменения кривой вдува. Необходимо отметить, что параметр U_1^* является также слабой функцией температуры электрода, поэтому не всегда кривая $U_1^* = f(\tau)$ в точности повторяет изгибы кривой вдува. Значения U_1^* нанесены для температуры электрода $T_w = 1200 \pm 150^\circ \text{C}$. Влияние температуры электрода на U_1^* в выбранном диапазоне мало.

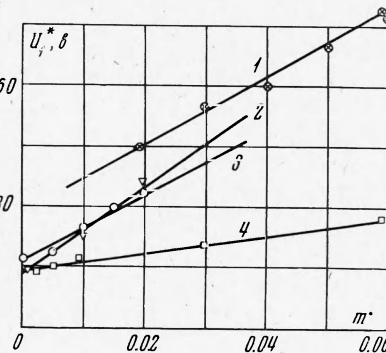
Влияние температуры и подвода массы в приэлектродный слой сказывается на режиме дугового разряда, очевидно, через изменение сопротивления пограничного слоя.

С ростом температуры электрода и связанным с ним падением сопротивления в пограничном слое у электрода разряд становится более устойчивым [5]. При постоянной температуре электрода увеличение вдува защитных газов приводит к увеличению сопротивления пограничного слоя, что видно на фиг. 2 по увеличению угла α наклона характеристики в анодном режиме (при $j < 0$). Значение $\tan \alpha \sim R_a$, характеризующее сопротивление пограничного слоя, как видно, нарастает. Это нарастание может быть связано как с изменением баланса заряженных частиц в приэлектродной зоне, где имеется нормальная к поверхности электрода составляющая скорости, так и с уменьшением концентрации присадки в зоне влияния вдува.

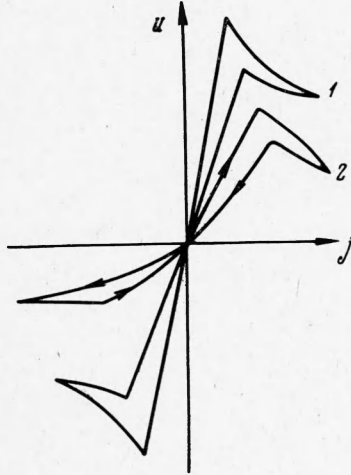
Зависимости $U_1^* = f(m')$ при различных значениях T_w и ψ для некоторых испытанных материалов приведены на фиг. 4, где кривая 1 для TiC (N_2), $T_w = 1200^\circ C$; кривая 2 для графита (N_2), $T_w = 1200^\circ C$; кривая 3 для графита (Ar), $T_w = 1000^\circ C$; кривая 4 для $ZrB_2 + LaB_6$ (Ar), $T_w = 1300^\circ C$. Как видно, значения U_1^* могут изменяться в 3–4 раза при нарастании вдува до $m' = 0.08$.

При сильных вдувах ($m' = 0.07–0.1$) в вольт-амперных характеристиках наблюдается явно выраженные гистерезисные явления при прямом и обратном ходе луча, связанные с джоулевыми тепловыделениями в приэлектродной зоне.

Вид такой характеристики показан на фиг. 5. Кривая 2 представляет собой характеристику типа электрод-зонд [5] для электрода, работающего в режиме дугового разряда при сильном вдуве азота. Кривая 1 представляет собой типичную динамическую характеристи-



Фиг. 4



Фиг. 5

ку (типа электрод-электрод) дуги переменного тока [6]. При нарастании тока падение напряжения выше, чем при уменьшении тока, так как в первом случае часть энергии тратится на выделение джоулева тепла. Наличие гистерезиса характерно для холодных электродов и исчезает с ростом температуры в связи с термической инерционностью электрода.

В экспериментах по защите электродов от окисления и эрозии для достижения практически нулевых износозов за время запуска (до 10 мин) использовались вдувы $m' = 0.02–0.03$. В этом диапазоне вдувов не наблюдается возникновение гистерезисных явлений, но четко проявляется затягивание перехода к дуговому режиму и неустойчивость горения дуги на катоде.

Это позволяет сделать вывод, что помимо тепловой и химической защиты материала применение вдува нейтральных газов позволяет при прочих равных условиях обеспечивать режим распределенного разряда при более высоких значениях напряжения между электродами, что позволяет снять более высокие плотности тока без перехода к дуговому режиму. Отсутствие дуговых пятен способствует также снижению эрозии электродов.

Авторы благодарят В. Е. Акиншину, А. А. Басовскую и Ю. В. Барышева за помощь в проведении и обработке результатов эксперимента.

Поступила 30 I 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман В. О., Кукота Ю. П., Любимов Г. А. Экспериментальное исследование работы электродных материалов с применением тепловой и химической защиты поверхности. В сб. «Вопросы технической теплофизики», Киев, «Наукова думка», 1968.
2. Барышев Ю. В., Герман В. О., Кукота Ю. П., Любимов Г. А., Парфенов Б. В. Регистрация дуговых разрядов на катоде модели МГД-устройства. ПМТФ, 1968, № 2.
3. Герман В. О., Кукота Ю. П., Любимов Г. А., Щеголев Г. М., Применение вдува нейтральных газов для защиты электродов МГД-устройств. Теплофизика высоких температур, 1969, т. 7, вып. 1.
4. Герман В. О., Любимов Г. А., Парфенов Б. В. Экспериментальное исследование работы электрода в потоке воздуха, содержащего присадку калия. Теплофизика высоких температур, 1967, № 3.
5. Барышев Ю. В., Герман В. О., Парфенов Б. В., Соловьев Б. С., Экспериментальное исследование приэлектродных явлений. ПМТФ, 1968, № 4.
6. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма., М., Изд-во иностр. лит., 1961.