

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДНЫХ ПЯТЕН ПРИ НАЛИЧИИ ШЛАКОВЫХ ПЛЕНОК НА ЭЛЕКТРОДАХ МГД-ГЕНЕРАТОРА ОТКРЫТОГО ЦИКЛА

*В. И. Залкинд, В. В. Кириллов, А. П. Маркина*

*(Москва)*

Изучению работы электродов (катодов) в канале МГД-генератора открытого цикла уделяется большое внимание [1—3]. Это связано с тем, что процессы, протекающие на электродах, оказывают существенное влияние на эрозию материала и электрические характеристики электродов. Условия в канале МГД-генератора имеют свои специфические особенности, к которым прежде всего следует отнести высокотемпературный поток плазмы продуктов сгорания и высаживание на поверхности электродов пленки солей калия. Эти факторы оказывают существенное влияние на поведение катодных пятен.

В каналах МГД-генераторов, работающих на угле, в потоке плазмы продуктов сгорания присутствует несгорающая минеральная часть топлива (зола). Поэтому на поверхности электродов, кроме соединений солей калия, будут высаживаться шлаки, состоящие из различных тугоплавких окислов, отличающихся от соединений калия электропроводностью, теплопроводностью и эмиссионными характеристиками.

Параметры катодных пятен, а следовательно, и эрозионные характеристики электродов при высаживании таких пленок могут существенно отличаться от тех, которые приведены в [3].

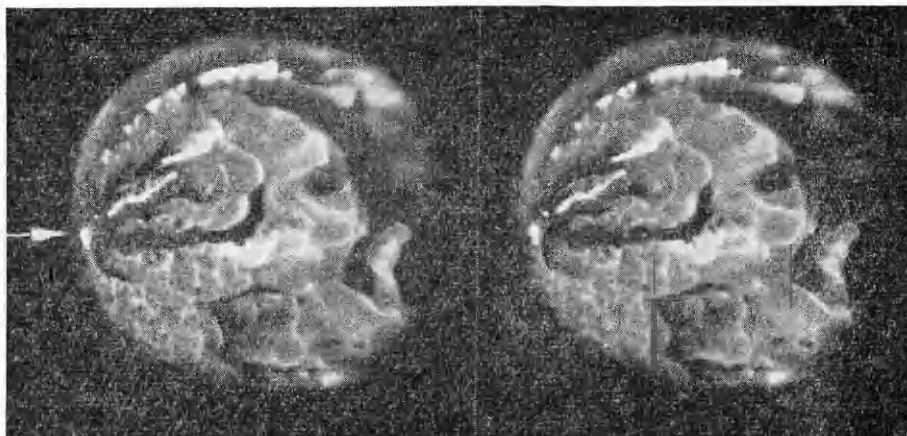
Цель данной работы — изучение основных особенностей поведения катодных пятен на электродах МГД-генератора открытого цикла, работающего на угле.

Эксперименты проводились в канале МГД-генератора крупной экспериментальной установки У-02 [4]. Длина канала 600 мм, ширина 180 мм, высота по направлению магнитного поля 90 мм. Поток плазмы состоял из продуктов сгорания природного газа в обогащенном до 50% кислородом и предварительно подогретом до 250°C воздухе с добавкой солей калия в качестве ионизированной присадки. Минеральная часть топлива подавалась в виде золы кузнецких углей марки «Т» в количестве, эквивалентном случаю сжигания угля, и составляла 1% от общего расхода продуктов сгорания. В состав отложений шлаков на электродах, определенный с помощью химического анализа во Всесоюзном теплотехническом институте им. Ф. Э. Дзержинского, входили, %: SiO<sub>2</sub> 45,4; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 19,4; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12,8; CaO 3,5; K<sub>2</sub>O 13; TiO<sub>2</sub> 1,4; MgO 1,3; Na<sub>2</sub>O 0,2 и некоторые другие окислы. Температура ядра потока плазмы продуктов сгорания 2470—2520 К, скорость потока 350 м/с при давлении в канале 0,75—0,9 ат (1 ат = 98, 0665 к Па).

Для изучения поведения катодных пятен применялась скоростная фотосъемка, которая проводилась с помощью скоростного фоторегистратора СФР-Л, работающего в режиме «лупы времени». Скорость съемки изменялась от 40 000 до 120 000 кадр/с. Одновременно велось осциллографирование тока, протекающего через электрод.

Измерение площади и скорости перемещения катодных пятен проводилось по методике, описанной в [3].

Исследования проводились на электродах, выполненных из бескислородной меди (температура поверхности 400°C) и хромового сплава (температура поверхности 1100°C), имеющих форму полусферы диаметром 40 мм и выступающих в поток плазмы продуктов сгорания на 40 мм. Кроме этого, исследовались электроды из карбида кремния (температура поверхности



Фиг. 1

1350—1400°C) и двуокиси циркония с добавкой 20% диборида циркония (температура поверхности 1350—1400°C), имеющие форму цилиндра диаметром 40 мм и выступающие в поток на 10 мм.

При отсутствии тока на поверхности электродов сравнительно быстро (в течение нескольких минут) высаждается слой шлаковой пленки, имеющей низкую теплопроводность (порядка 1—1,7 ккал/м·ч·град) и толщину 2—3 мм, измеренную после изъятия электродов из канала. Температура поверхностного слоя пленки, измеренная оптическим пирометром, быстро достигала температуры плавления (1450—1500°C), в результате чего на поверхности электродов наблюдались характерные волны сдуваемой потоком жидкой пленки (фиг. 1). Протекание тока больше 2—4 А через катод сопровождается появлением катодных пятен.

Известно, что на электродах, имеющих различные конфигурации, обтекание потоком их поверхности различное. Поэтому и картина горения катодных пятен меняется в зависимости от формы электродов [3, 4]. Вследствие этого испытываемые электроды можно разделить на две группы: полусферические и цилиндрические.

На полусферическом электроде, как и при отсутствии шлаковых пленок, катодные пятна горят только на первой половине поверхности (см. фиг. 1). При токах, меньших 20 А, в основном наблюдаются одиночные пятна, места горения которых расположены хаотично на первой половине электрода. По мере увеличения тока (до 50 А) число пятен растет, в результате чего в зоне набегания наблюдаются целые цепочки катодных пятен, направление которых совпадает с направлением потока, обтекающего электрод.

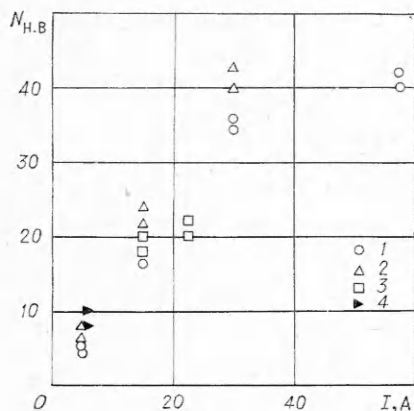
Под действием катодных пятен шлаки испаряются, и на электроде образуются области, очищенные от визуально заметного слоя пленки. При увеличении тока размеры этих областей растут, однако, если в случае высаждения на поверхности электрода солей калия (KOH и K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) зона набегания потока достаточно быстро (в течение нескольких минут) очищалась от визуально заметного слоя этих соединений и в зоне отрыва потока (в центральной части электрода) образовалась четкая граница очищенной поверхности электрода с толстым слоем пленки, то при наличии золы в продуктах сгорания такой границы не наблюдается. По-видимому, это связано с тем, что скорость высаждения шлаковой пленки (но крайней мере на выступающих в поток электродах) на порядок выше

скорости высаживания пленки, состоящей только из солей калия. Если принять коэффициент прилипания частиц шлака, ударяющихся о поверхность электродов, когда на них уже существует достаточно липкая пленка, близким к единице [5], то скорость высаживания пленки в наших опытах  $1,5 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>·с. Кроме того, скорость эрозии шлаковой пленки под действием катодных пятен, как показали эксперименты, значительно меньше, чем соединений калия.

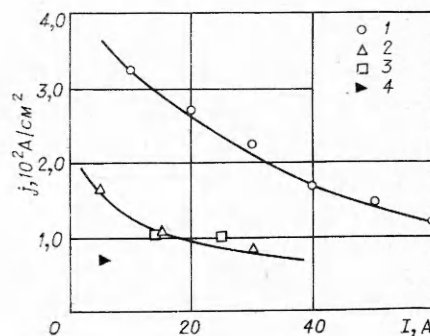
Следовательно, при высаждении на поверхности электродов шлаковых пленок в зоне набегания потока имеются благоприятные условия для горения катодных пятен, так как в ней всегда имеется граница чистой поверхности электрода и шлаковой пленки, вблизи которой предпочитают гореть пятна. При этом пятна горят именно на поверхности шлаковых пленок. На шлаковых пленках вокруг катодных пятен можно наблюдать достаточно протяженные области, в которых температура значительно превышает среднюю температуру пленки. Возникновение таких областей, вероятно, может быть вызвано низкой теплопроводностью (особенно вблизи контакта с металлом) и джоулевым разогревом пленки при протекании по ней тока.

Определение основных параметров катодных пятен (средней скорости перемещения, средней площади, наиболее вероятного числа пятен, плотности тока и т. д.) показало, что, как и в случае отсутствия шлаков [3], катодные пятна, горящие в зоне набегания потока, имеют меньшие размеры, большие скорости перемещения и большие плотности тока в пятне.

Однако наличие шлаковых пленок привело к тому, что на медном электроде площади наиболее вероятного числа пятен, плотность тока в пятне и т. д. по сравнению с данными, приведенными в [3], существенно изменились. На фиг. 2, 3 (кривые 1 — параметры катодных пятен на электроде, выполненном из бескислородной меди; 2 — из хромового сплава; 3 — из двуокиси циркония с добавкой диборида циркония; 4 — из карбида кремния) приведены зависимости наиболее вероятного числа пятен  $N_{н.в}$  (фиг. 2) и средней плотности тока в пятне (фиг. 3) от общего тока, протекающего через электрод. Из этих зависимостей видно, что площади пятен и число пятен на медном электроде возросли по сравнению с данными, приведенными в [3], почти на порядок, а плотность тока уменьшилась соответственно на два порядка до  $3-1,3 \cdot 10^2$  А/см<sup>2</sup>. Как и в случае «чистых» условий, количество пятен с увеличением тока на электрод растет, а плотность тока в пятнах заметно падает. Измерение скорости перемещения катодных пятен показало, что она практически не измени-



Фиг. 2



Фиг. 3

лась и составляет  $1-2 \cdot 10^2$  см/с в зоне набегания потока и  $2-4 \cdot 10^1$  см/с в зоне отрыва потока. Что касается среднего времени жизни катодных пятен, то оно увеличилось до 1,5 мс.

На цилиндрических электродах катодные пятна горят практически на всей поверхности электрода. Однако и в этом случае они горят только на границе пленки с чистой поверхностью электрода, причем можно наблюдать целые скопления пятен вокруг какого-нибудь «островка» пленки. В остальном наблюдаются все те закономерности, которые присущи полусферическим электродам.

Уменьшение теплопроводности материала катода [6] приводит к увеличению площади и времени жизни катодных пятен. Такое же влияние на параметры катодных пятен оказывает повышение средней температуры поверхности электрода [3]. Следовательно, при одновременном увеличении температуры поверхности и уменьшении теплопроводности материала времени жизни и площади катодных пятен должны существенно возрасти. В проведенных опытах теплопроводность исследуемых материалов варьировалась в широких пределах и составляла для бескислородной меди 3,8, для хромового сплава и карбида кремния 0,7—0,8, для двуокиси циркония с 20% добавкой диборида циркония 0,03 Вт/см·град. Температура поверхности электродов, как было указано выше, варьировалась от 400 до 1300—1400°C. Сравнение параметров катодных пятен показало, что при наличии шлаковых пленок указанное значительное различие в теплопроводности и температуре исследуемых материалов сравнительно мало влияет на параметры пятен: площади пленок возросли в 2,5—3 раза, наиболее вероятное число пятен изменилось незначительно.

Столь малое влияние теплофизических свойств и температуры электродов можно объяснить тем, что на их поверхности высаждается пленка шлаков, имеющая при протекании тока приблизительно одинаковую температуру (1500—1600°C) и толщину, причем последняя такова, что пленка, на которой горят катодные пятна, работает как массивный катод. Действительно, толщина пленок, оцененная по температуре поверхности, тепловому потоку и теплопроводности шлаков при протекании тока, составляла не менее 0,5—1 мм. Следовательно, материал электрода будет выполнять роль подложки, поэтому его теплофизические свойства и температура не будут существенно влиять на параметры катодных пятен. В связи с этим на основании представлений о влиянии параметров катодных пятен на электрические характеристики электродов, изложенных в [7], можно предположить, что суммарное эффективное приэлектродное падение напряжения между электродом и потоком плазмы должно мало отличаться на различных материалах. Кроме того, сравнительно большие размеры и количество пятен, вероятно, приведут к существенному снижению приэлектродных падений напряжения [7] по сравнению с отсутствием шлаков. Эксперименты, проведенные на установке У-02, показали, что при наличии шлаковых пленок величины приэлектродных падений довольно низки и мало отличаются на испытанных электродах [8].

Таким образом, активное участие шлаковых пленок в процессе горения катодных пятен вызывает снижение приэлектродных падений напряжения и, вероятно, должно привести к уменьшению локальной (под действием катодных пятен) эрозии материала катода. Однако химическая эрозия при наличии шлаков может значительно увеличиться, поэтому при выборе материала необходимо обратить внимание на его химическую стойкость по отношению к шлакам.

*Поступила 8 IX 1975*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитогиродинамические генераторы открытого цикла. М., «Мир», 1972.
2. Дикс Дж. Б., Ву И. К. Л., Денцел Д. Л., Кроуфорд Л. В. Мюльхаузер Дж., Чанг П., Шанглин Р. В., Зиноу Ю. Некоторые результаты исследования генератора с диагонально проводящими стенками. МГД-метод получения энергии. М., «Энергия», 1971.
3. Залкинд В. И., Кириллов В. В., Маркина А. П., Тихоцкий А. С., Успенская Г. Л. Экспериментальное исследование катодных пятен на выступающих в поток металлических электродах. — ПМТФ, 1974, № 2.
4. Кириллин В. А., Шейндлин А. Е., Шумяцкий Б. Я., Кириллов В. В., Буренков Д. К., Раховский В. И. Некоторые результаты исследований на модельной МГД-установке У-02. — В кн.: V Международный симпозиум по магнитогиродинамическому методу получения электрической энергии. Т. 1. Мюнхен, 1971.
5. Залкинд И. В., Троянкин Ю. В. Огнеупоры и шлаки в металлургии. М., Metallurgиздат, 1964.
6. Зыкова Н. М., Канцель В. В., Раховский В. И., Селиверстова И. Ф., Устимец А. П. Динамика развития катодной и анодной областей электрической дуги. — ЖТФ, 1970, т. XL, вып. 11.
7. Залкинд В. И., Зуева Н. В., Кириллов В. В., Маркина А. П., Тихоцкий А. С., Игитханов Ю. Л., Исаенков Ю. И., Недоспасов А. В., Побережский Л. П., Пузырев М. К. Исследование микродугового режима работы электродов в МГД-генераторе открытого цикла. — В кн.: I Советско-американский коллоквиум по МГД-преобразованию энергии. М., 1974.
8. Буренков Д. К., Долинский Ю. П., Замыслов О. Б., Залкинд В. И., Зеликсон Ю. М., Кириллов В. В., Горостылев В. Ф., Маркина А. П., Тихоцкий А. С. Влияние шлаковых пленок на работу электродов и характеристики канала МГД-генератора открытого цикла. — В кн.: VI Международный симпозиум по магнитогиродинамическому методу получения электроэнергии. Вашингтон, 1975.

УДК 533.6.011.72.

**КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ,  
ОТРАЖЕННОЙ ОТ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОГНУТОЙ СТЕНКИ***Б. А. Клопов, Е. Е. Мешков, А. И. Толшмяков**(Москва)*

В работе [1] описан кумулятивный эффект, возникающий при отражении ударной волны от цилиндрической вогнутой стенки, помещенной в конце канала ударной трубы прямоугольного сечения. Интенсивность отраженной волны (число Маха  $M$ ) при этом возрастала  $\sim$  в 1,5 раза по сравнению со случаем отражения волны от плоской стенки.

Эксперименты проводились на ударной трубе, конструкция которой сходна с описанной в [2]. Камера и канал ударной трубы изготовлены из обычной стальной трубы с внутренним диаметром 208 мм. В конце канала помещалась измерительная секция — стальная труба с внутренним диаметром 120 мм. Передняя часть этой трубы с острыми кромками заходила в глубь канала с таким расчетом, чтобы волна, заходящая между стенками канала и измерительной секции, не влияла на течение в последней во время эксперимента. В качестве рабочей диафрагмы использовалась пленка из ацетата целлюлозы толщиной 0,2 мм в 2 слоя. По обе стороны диафрагмы был воздух: в канале — при атмосферном давлении, в камере — при давлении 2,5 ати; число Маха ударной волны равно  $1,27 \pm 0,01$ .

На фиг. 1 приведена схема устройства измерительной секции, где проводился эксперимент. Конец измерительной секции заглушали плотно