

УДК 533.924

*М. Г. Мусаев*

### ЭРОЗИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В СВЕРХЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

Изучение закономерностей эрозионного разрушения материала электродов, работающих в режиме катодных пятен в высокоскоростном потоке проводящего газа, имеет большое значение для разработки канала импульсных магнитогидродинамических генераторов (МГД-генераторы), которые широко применяются в народном хозяйстве [1].

Электрический разряд на электродах в МГД-канале может быть либо концентрированным, когда электрический ток сосредоточен в одной или нескольких токовых привязках, либо диффузным, для которого характерно равномерное распределение плотности тока на поверхности электрода.

Дуговой разряд обеспечивает высокие плотности тока при умеренном падении напряжения на электродах. Однако появление дуг на поверхности электрода, сопровождаемое электрическим пробоем приэлектродного и пограничных слоев в канале, вызывает эрозию электродов, уменьшая срок их службы и ухудшая эксплуатационные характеристики импульсного МГД-генератора.

Цель данной работы — определение оптимальных режимов работы электродных стенок канала импульсного МГД-генератора с наименьшей эрозией.

В проведенных экспериментах использовалась ударная труба диафрагменного типа, состоящая из двух камер (высокого давления (КВД) и низкого (КНД)), разделенных медной диафрагмой толщиной 1 мм с крестообразной насечкой. КВД длиной 1 м наполнялась кислородно-водородной горючей смесью с добавкой гелия при начальном давлении  $4 \cdot 10^5$  Па. Измерительный канал длиной 400 мм был смонтирован на участке равномерного движения скорости фронта ударной волны в КНД, что упрощает исследование. Конструкция установки более детально описана в [2].

В КНД использовали арговодородную смесь с содержанием водорода в смеси 10% при начальном давлении в КНД  $1,2 \cdot 10^3$  Па. Скорость ударных волн находили с помощью ионизационных датчиков, расположенных вдоль ударной трубы. Равновесные параметры ударно-сжатой плазмы определяли по скорости ударных волн и начальной давлению газа в КНД. Число Маха ударных волн  $M_1 \approx 12$ , равновесная температура плазмы  $10^4$  К, скорость плазмы за ударной волной 3500 м/с, число Маха потока  $M_2 \approx 1,6$  и давление за ударной волной около  $2 \cdot 10^5$  Па. Длительность прохождения зоны ударно-сжатого газа через измерительную камеру около 250 мкс.

При исследовании приэлектродных процессов регистрировали токовые осциллограммы импульсного разряда батареи конденсаторов с общей емкостью  $3 \cdot 10^{-3}$  Ф при начальном напряжении 100—600 В через межэлектродный промежуток с ударно-сжатой плазмой и последовательно включенное нагрузочное сопротивление ( $R_n = 4$  Ом).

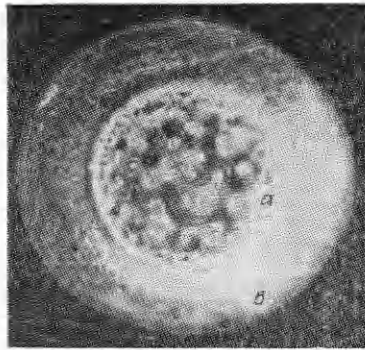


Рис. 1

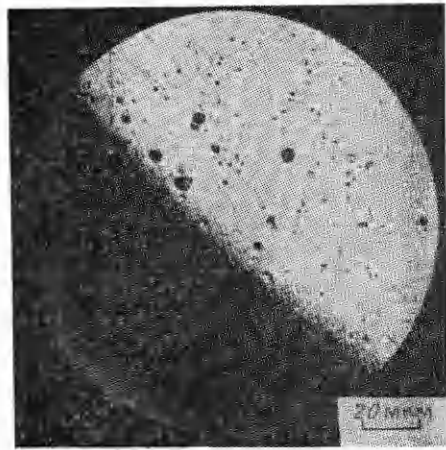


Рис. 2

Оптимальные условия работы определяли с помощью вольт-амперных характеристик межэлектродного промежутка, обработанных по осциллограммам разрядного тока, совместно с изучением фоторазвертки свечения разряда на электродах в зависимости от состояния поверхности электрода и теплофизических свойств плазмы в канале.

Минимальная эрозия имела место в случае, когда во время горения разряда обеспечивался режим горения пятен первого типа. Электрический разряд в канале, приводящий к возникновению на электродах групповых пятен или пятен второго типа, вызывает заметное увеличение скорости эрозии [3, 4].

Первоначально были использованы механически полированные медные электроды круглого сечения диаметром 10 мм. При  $I \geq 20$  А на электродах появились пятна второго типа. Они сносятся потоком и располагаются на задней кромке по потоку электрода. Далее были использованы медные электроды, которые подвергали электродуговой обработке следующим образом: в КНД нагнетали рабочий газ ( $H_2 - 10\% + Ar - 90\%$ ). При начальном давлении в камере  $p = 1,3 \cdot 10^3$  Па на электроды подавали напряжение  $U_0 \approx 600$  В. Далее на краях электрода постепенно с откачкой камеры наблюдали оранжево-фиолетовое диффузное свечение. С приходом фронта ударной волны ток протекал в контрагированном режиме в центре электрода.

Интересен тот факт, что в центре электрода, где протекал ток в контрагированном режиме (рис. 1, а), видны оплавленные неровности с четко выраженной границей в виде окружности, отделяющей область диффузного свечения (рис. 1, б). Выбирая поверхность электрода ближе к сферической форме, достигали равномерного диффузного свечения поверхности электрода. В этом случае, когда происходил межэлектродный пробой, на поверхности электрода не наблюдали оплавленные неровности. Таким путем электрически легированные электроды использовали в сверхзвуковом канале. В отличие от электродов до легирования на легированных электродах в сверхзвуковом канале наблюдали в широком диапазоне токов только пятна первого типа (рис. 2). При этом на основе анализа вольт-амперных характеристик межэлектродного промежутка выяснилось, что сопротивление приэлектродных областей для делящихся пятен ниже, чем для периферийных дуговых привязок [5].

Эрозионный унос определяли по размеру лунок, оставляемых катодными пятнами. Для измерения размеров эрозионных следов применяли оптическую профилографию. При этом относительная погрешность достигала 10%, а относительная ошибка измерения объема лунок не превышала 30%. Отличие истинной формы лунки от принятой также влияет на измерения. В наших измерениях истинную конфигурацию поверхности

лунок аппроксимировали кругом или прямоугольником. Профиль глубины лунок усредняли и почти во всех измерениях для нахождения объема эрозионной лунки площадь ее поверхности умножали на среднее значение глубины лунки. Интенсивность эрозии медных электродов в сверхзвуковом импульсном канале в интервале токов 10—30 А составляла от 20 до 40 мг · Кл<sup>-1</sup>, что согласуется с данными [4, 6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Велихов Е. П., Волков Ю. М. Перспективы развития импульсной МГД-энергетики и ее применение в геологии и геофизике.— М., 1981.— (Препр./ИАЭ; № 3436/6).
2. Мусаев М. Г., Чекалин Э. К., Черных Л. В. Свойства контрагированного разряда в неоднородном пограничном слое на электроде в высокоскоростном потоке плазмы // ПМТФ.— 1988.— № 3.
3. Зыкова Н. М., Куракина Т. С. Исследование разряда на медных охлаждаемых электродах в плазме продуктов сгорания // ТВТ.— 1976.— Т. 14, № 5.
4. Залкинд В. И., Кириллов В. В., Маркина А. П. Катодные пятна и эрозия металлических электродов в канале МГД-генератора открытого цикла // ТВТ.— 1982.— Т. 20, № 6.
5. Мусаев М. Г., Тищенко В. А., Чекалин Э. И., Юревич Т. В. Исследование режима нестационарных катодных пятен на электродах в импульсном сверхзвуковом потоке плазмы // Инженерные проблемы термоядерных электростанций.— М.: ЭНИН, 1981.
6. Богдонас А. В., Башилов В. А., Грибков В. М. и др. Изучение процессов на холодных электродах в канале МГД-генератора // Первый советско-американский коллоквиум по МГД-преобразованию энергии.— М.: Ин-т высоких температур АН СССР, 1974.

г. Москва

Поступила 27/VI 1990 г.,  
в окончательном варианте —  
20/IV 1992 г.

УДК 531.1 : 530.182

А. П. Алдушин

### ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ НИТИ НАКАЛИВАНИЯ

Хорошо известный из практики эффект внезапного перегорания элементов электрической цепи относится к широкому классу критических явлений, изучаемых макроскопической кинетикой [1]. Существование электрических аналогов химического взрыва впервые отмечено Н. Н. Семеновым на примере теплового пробоя диэлектриков [2]. В отличие от диэлектриков проводник с током, рассматриваемый как сосредоточенный объект энерговыделения, не обладает свойством взрывной неустойчивости. Эффект взрывной неустойчивости возникает, если учесть распределенность системы и связанную с этим возможность пространственного возмущения характеристик. В свете этого пробой можно трактовать как локальное испарение проводника вследствие спонтанного обострения температурной неоднородности.

1. Рассматривается теплоизолированная с торцов нить сопротивления, на концах которой поддерживается постоянное напряжение  $U$ . В химически инертной среде уравнение теплового баланса нити имеет вид

$$(1.1) \quad c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{U^2 \rho}{r^4 \left[ \int_0^l \rho r^{-2} dx \right]^2} - \frac{2\alpha}{r} (T - T_0) - \frac{2\sigma}{r} T^4 + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

где  $x$  — продольная координата;  $T$ ,  $T_0$  — температура нити и окружающей среды;  $c$  — теплоемкость единицы объема;  $r$  — радиус;  $l$  — длина