

В. Г. Жоголь, В. Ф. Резниченко, С. В. Селищев, А. А. Углов

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ АВТОСТРУКТУРЫ ПРИ НЕУСТОЙЧИВОМ ИСПАРЕНИИ КАТОДОВ В ИМПУЛЬСНОМ УНИПОЛЯРНОМ РАЗРЯДЕ

Воздействие концентрированных потоков энергии (КПЭ) (импульсный разряд, лазерное излучение, электронный луч и др.) на материал сопровождается неустойчивостью истечения эрозивной плазмы [1—3]. Пульсации ионизованного газа вблизи поверхности мишени влияют на теплофизические и газодинамические процессы, характер массопереноса и, как следствие, на физико-механические свойства зоны воздействия. В общем виде существуют пульсации эрозивной плазмы с двумя типами пространственно-временных структур: в виде пачек [1, 3] — прерывистых плазменных потоков, диаметр которых в начальный момент времени равен диаметру КПЭ, и струйные пульсации [1, 2] — отдельные плазменные потоки, возникающие хаотично в различных участках зоны воздействия КПЭ.

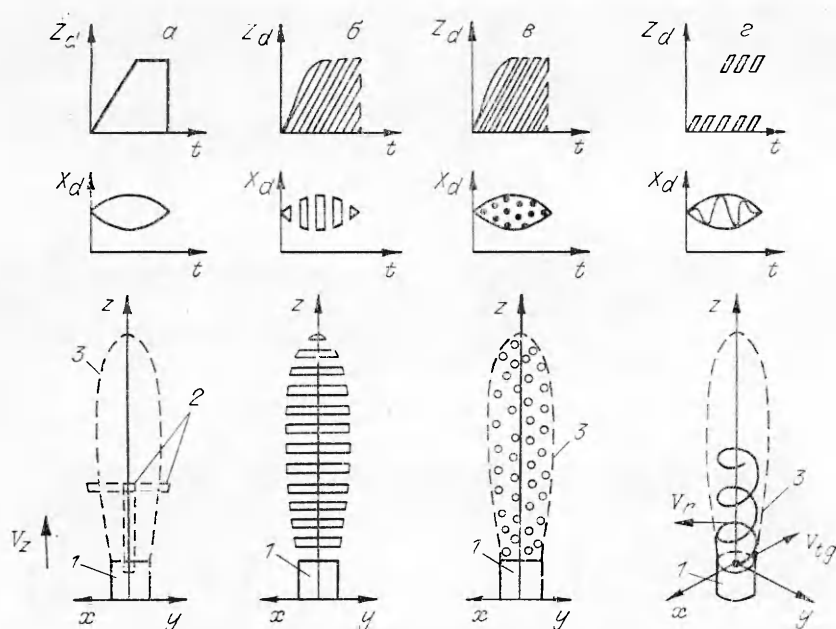
В данной работе показано, что при воздействии импульсного униполярного разряда в газовой среде на катоды из различных материалов наблюдается еще один тип пространственно-временной структуры эрозивной плазмы — спиралевидный. Получены условия взаимоперехода различных типов структуры эрозивного факела. Показано, что пространственно-временная структура испарения зависит от энергии, длительности импульса и вида материала катода.

Методика эксперимента. Струя эрозивной плазмы (факела), расширяющаяся с катода, фотографировалась методом щелевых разверток фотоэлектронным регистратором ФЭР-7. Разряд возбуждался между торцом цилиндрического катода и краем плоского анода, расположенного перпендикулярно оси катода. В разрядную зону подавался защитный газ (азот). В качестве катода были использованы прутки $\varnothing = 2$ мм из W, Mo, Ti, Ni и Cr, в качестве анода — W. Электрические импульсы имели следующие параметры: энергия импульсов $W_u = 4,8 \div 10,8$ Дж, длительность импульсов $\tau_u = 1,2 \div 1,6$ и $0,12 \div 0,14$ мс. (Более подробно экспериментальная схема и электрические параметры импульсов описаны в [4].) Фоторегистрация факела осуществлялась в двух направлениях: продольном (щелевая диафрагма ФЭР с размером щели 50 мкм параллельна оси факела) и поперечном (щелевая диафрагма перпендикулярна оси факела). При регистрации в поперечном направлении исследовались две зоны факела, удаленные от торца катода на 50—100 мкм и 15—20 мм. Для простоты расшифровки фотохронограмм рассмотрим схемы некоторых идеализированных движений струи эрозивного факела.

На рис. 1 показаны факелы при непрерывном испарении катода 1 без внутренней структуры (а), с пространственно-временной структурой в виде пачек (б), с филаментацией струи (в), с винтовой неустойчивостью (г) и соответствующие продольные и поперечные фотохронограммы (графики $Z_d(t) = Z_d$, $X_d(t) = X_d$, где Z_d и X_d — координаты в щелевой диафрагме 2, расположенной параллельно одной из осей координат).

Фотохронограммы факела без внутренней структуры (а) имеют равномерный фон засветки, граница которого отвечает фронту факела 3. Скорость фронта в направлении оси Z $V_\phi = dZ_d(t)/dt$. Аналогично определяется V_ϕ в направлении оси x.

Факел с пространственно-временной структурой в виде пачек (б) представляется на продольной фотохронограмме как чередование серии непрерывных светлых и темных полос, наклоненных к оси времени. На поперечной фотохронограмме наклон полос к оси времени отсутствует. Полосы являются следствием дискретности структуры, причем ширина полос, равная X_d , соответствует поперечному размеру пачки. Видно, что скорость отдельного элемента структуры не равна скорости фронта факела. Ширина темной полосы характеризует паузу между пульсациями.



Р и с. 1

Ширина белой полосы на продольной фотохронограмме отвечает длительности (периоду) единичного элемента структуры.

Изображение факела с филаментацией струи (б) на продольной фотохронограмме — это также серия полос, наклоненных к оси времени. Однако на поперечной фотохронограмме вместо полос появляются точки или пятна небольшого размера. Скорость отдельных элементов структуры определяется тангенсом угла наклона полосы. Расщепление полосы (образование вилки) соответствует возникновению неподвижной ударной волны [3].

Более сложной пространственно-временной структурой факела является спираль. Спиралеобразная структура может существовать при различных движениях эрозивной плазмы: 1) вращается источник пара по периферии катода со скоростью V_r , струя движется прямолинейно со скоростью V_z ; 2) источник пара неподвижен, а струя движется по винтовой линии со скоростью V_{tg} ; 3) при условии $V_r > 0$, $V_z > 0$ и $V_{tg} > 0$. В первом случае продольная фотохронограмма будет иметь вид полос, наклоненных к оси времени, а поперечная — вид проекции винтовой линии на плоскость, т. е. синусоиды. Расстояние между полосами равно половине периода вращения источника пара. Во втором случае на продольной фотохронограмме должны наблюдаться полосы, параллельные оси времени, начало которых сдвинуто относительно друг друга. На поперечной фотохронограмме они тоже должны наблюдаться. Для последнего случая продольная и поперечная фотохронограммы приведены на рис. 1, г. На продольной фотохронограмме будут наблюдаться дискретные полосы, параллельные оси времени, причем первая полоса обязательно дискретна, а дискретность второй полосы необязательна (зависит от соотношения между скоростями V_{tg} и V_z). Темный промежуток между полосами обусловлен выходом струи плазмы из зоны видимости щелевой диафрагмы. Время между выходом из зоны видимости и возвращением в нее равно времени полуоборота вокруг оси z , или половине периода вращения. В этом случае поперечная фотохронограмма также имеет вид синусоиды.

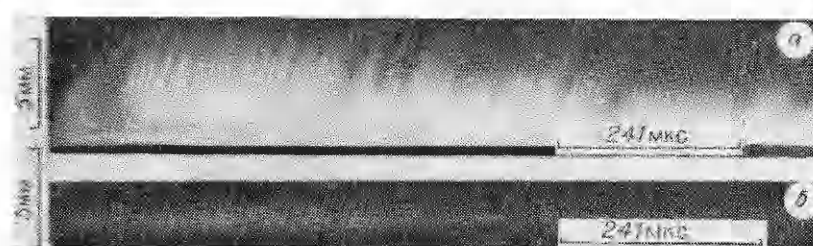
Результаты экспериментов и их обсуждение. Факелы катодов из W и Ti при $\tau_u = 1,2 \div 1,6$ мс испаряются практически без пульсаций (рис. 2). На более коротких развертках замечен небольшой участок с пульсациями в виде пачек у W-катода, которые быстро прекращаются. Скорость фронта факела уменьшается неравномерно, причем существует



Р и с. 2



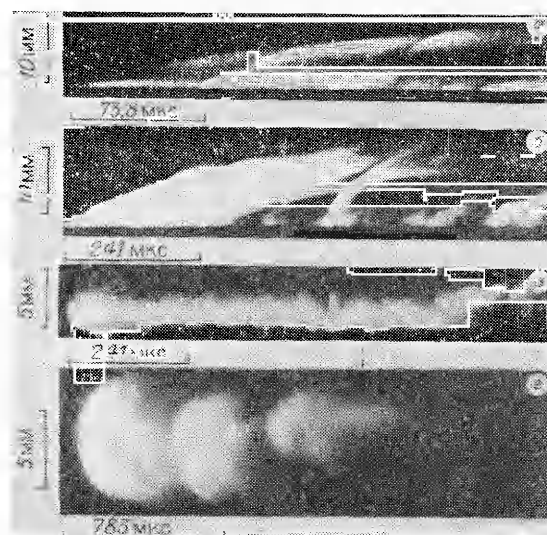
Р и с. 3



Р и с. 4

участок, где она постоянна. При $\tau_u = 0,12 \div 0,14$ мс пульсации наблюдаются в течение всего импульса.

Структура пульсаций Сг-катода зависит от W_u . При $W_u > 8$ Дж и $\tau_u = 1,2 \div 1,6$ мс в течение всего импульса наблюдаются пачки (рис. 3), а при меньших значениях происходит филаментация струи (рис. 4). Скорость отдельных элементов структуры слабо меняется в течение импульса, причем она близка к начальной скорости фронта. Эрозионные факелы катодов из Мо и Ni испытывают винтовую неустойчивость при $\tau_u = 1,2 \div 1,6$ мс, которая периодически меняется на пульсации в виде пачек. На рис. 5, а представлена продольная фотохронограмма эрозионного факела Ni-катода. На ней хорошо заметны две дискретные поло-



Р и с. 5

сы, параллельные оси времени, и темное пространство между ними. Это признак того, что струя плазмы образует спиралеобразную структуру, причем в некоторые моменты времени такая структура образуется за счет вращения источника паров (отдельные светлые полосы пронизывают темное пространство), а в остальное время — за счет условий $V_r > 0$, $V_z > 0$ и $V_{tg} > 0$. Поперечная фотохронограмма аналогична рис. 5, в. Частоты вращения плазмы вокруг осей z и y источника пара по периферии катода равны $5 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^4$ Гц соответственно.

На рис. 5, б, в показаны продольная и поперечная фотохронограммы факела Мо-катода при $\tau_u = 1,2 \div 1,4$ мс. Как и в первом случае, наблюдаются два типа спиралеобразной пространственно-временной структуры факела. На поперечной фотохронограмме хорошо видна синусоида, чередующаяся местами с дискретными полосами. Синусоида отвечает спиралеобразной пространственно-временной структуре, а полосы — пачкам. На продольной фотохронограмме нижняя дискретная полоса имеет элементы небольшой протяженности, у которых угол наклона к оси времени не меняется. Это свидетельствует о том, что они не затормозились на видимом участке пути. Элементы исчезают из зоны видимости без потери скорости, что может происходить, только если струя движется по винтовой линии. Частота вращения источника пара по периферии катода весьма неравномерна у Мо-катода и может равняться $3,5 \cdot 10^3 \div 2,7 \cdot 10^4$ Гц. Частота вращения струи вокруг оси z $5 \cdot 10^3$ Гц.

В средней части фотохронограммы хорошо заметна раздваивающаяся полоса протяженностью до фронта факела. Характерная вилка свидетельствует о существовании стоячей ударной волны. Кроме того, на поперечной фотохронограмме в этот момент времени — «синусоида», следовательно, полоса образовалась из-за вращения источника пара.

На поперечной фотохронограмме удаленной части факела катодов из Мо и Ni (на 15—20 мм) наблюдается несколько светящихся образований относительно большого поперечного размера (рис. 5, г). Такие образования возникают из-за сжатия спиралеобразного потока эрозийного факела. Следует отметить, что во второй части импульса тока винтовая неустойчивость эрозийного факела Мо- и Ni-катодов существует только при условии $V_r > 0$, $V_z > 0$ и $V_{tg} > 0$, причем частота вращения к концу импульса падает до значений $1,7 \cdot 10^3$ Гц.

Пространственно-временная структура эрозийного факела зависит от материала катода, энергии и длительности импульса. Однако влияние энергии и длительности импульса неоднозначно для исследованных катодных материалов. Так, например, при $\tau_u = \text{const}$ к изменению W_u чувствителен только Сг, а уменьшение τ_u наиболее сильно влияет на W и Ti. Уменьшение длительности импульса сопровождается увеличением плотности мощности потока энергии на катоде, что является причиной развития неустойчивости испарения катодов из W и Ti. Незначительное увеличение плотности мощности на Сг-катоде (увеличение энергии импульса) приводит к смене одного типа пространственно-временной структуры на другой. Кроме того, филаментация струи при увеличении плотности мощности переходит в пачкообразную пространственно-временную структуру. Таким образом, плотность мощности и ее распределение для перечисленных катодов определяют пространственно-временную структуру факела.

Спиралеобразная пространственно-временная структура может образовываться по двум механизмам: вращение источника пара за счет воздействия на струю собственных скрещенных электромагнитных полей и чисто газодинамическое спонтанное закручивание [5]. Важное значение электромагнитных полей в формировании винтовой неустойчивости подтверждается тем, что катодные пятна вращаются во внешних магнитных полях [6], и снижением частоты вращения к концу импульса, которое можно объяснить уменьшением напряженности собственного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Углов А. А., Селищев С. В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. — М.: Наука, 1987.
2. Золотых Б. И., Гиоев К. Х. Роль факелов импульсного разряда в передаче энергии и эрозии электродов // Физические основы электроискровой обработки материалов. — М.: Наука, 1966.
3. Минько Л. Я. Лазерные плазменные ускорители и плазмотроны // Физика и применение плазменных ускорителей. — Минск: Наука и техника, 1974.
4. Жоголь В. Г., Резниченко В. Ф., Селищев С. В., Углов А. А. Структуры неустой-

- чивого испарения катодов при импульсном униполярном разряде в газе // Физика и химия обработки материалов. — 1989. — № 1.
5. Гольдштейн М. А., Жданова Е. М., Штерн В. Н. Возникновение вращательного движения в результате гидродинамической неустойчивости // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1985. — № 5.
6. Кесаев П. Г. Катодные процессы электрической дуги. — М.: Наука, 1968.

г. Москва

Поступила 21/XII 1988 г.

УДК 541.124.16:541.12.037

Ю. Н. Сухушин, И. Г. Ханефт

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ В ПЕРХЛОРАТЕ АММОНИЯ

Исследование электрического пробоя термодинамически лабильных веществ (веществ, разлагающихся при внешних воздействиях с экзотермическим эффектом) представляет большой интерес, поскольку носители заряда могут в них вступать в химическое взаимодействие, приводящее к распаду материала, минуя стадию преобразования электрической энергии в тепло [1, 2]. Не исключено также, что в результате химических превращений, инициируемых носителями заряда, образуются дополнительные электроны или дырки, поддерживающие проводимость в процессе пробоя или на предпробивных стадиях. Ранее при исследовании электрического инициирования азидов тяжелых металлов [3—6] показано, что в зависимости от макроскопических параметров (плотность ρ , межэлектродное расстояние L) могут осуществляться три различных по электрофизической природе процесса: разряд между зернами поликристаллического материала, микроразряды в порах и непосредственный электрический пробой, сопряженный с экзотермической реакцией распада. Перхлорат аммония (ПХА) — известный представитель класса термодинамически лабильных твердых веществ [7], существенно отличающийся от азидов по природе проводимости и реакции распада [8].

Целью настоящей работы является исследование феноменологии нарушения электрической прочности в монокристаллах и поликристаллических прессованных образцах ПХА на уровне выделения макроскопических стадий.

1. Для исследования использовался поликристаллический порошок ПХА марки ХЧ с гранулометрическим составом, характеризующимся максимумом распределения с размером частиц 30 мкм. Образцы поликристаллического материала готовились прессованием порошка на полированную поверхность закаленного ролика (сталь ШХ-15) в оболочку из полиметилметакрилата. К свободной поверхности таблетки прижимался с постоянным усилием, не деформирующим образец, 1/4-сферический электрод из того же материала. Предварительными экспериментами было показано, что введение защитной среды между поверхностью таблетки и 1/4-сферическим электродом не влияет на величину пробивного напряжения и ее зависимость от межэлектродного расстояния, что свидетельствует об отсутствии скользящих разрядов, и в дальнейшем защитная среда не применялась. При отработке методики было установлено, что прессование образцов, во-первых, сопровождается их сильным электростатическим заряджением, а во-вторых, приводит к коррозии материала электродов. Время, достаточное для разрядки образцов и не приводящее к появлению коррозии, составляет 3—5 ч, по истечении которого и проводилось определение электрической прочности.

Монокристаллы размещались под микроскопом в кондукторе типа [9], в них высверливались лунки диаметром 0,7 мм до необходимого межэлектродного расстояния. Насыщенный раствор ПХА в лунках служил электродом. Поляризационная микроскопия показала, что остаточных механических напряжений в межэлектродном промежутке монокристаллического образца нет. Пробивное напряжение определялось на фронте импульса напряжения амплитудой 10 кВ и длительностью фронта 1,5 мкс.

2. Исследовалась зависимость пробивного напряжения монокристаллов и поликристаллических образцов ПХА от межэлектродного расстояния в пределах 100—900 мкм, причем для прессованных образцов при