

ИССЛЕДОВАНИЕ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ ЭРОЗИИ ПОРИСТОГО КАТОДА ВАКУУМНОЙ ДУГИ

В. Н. Анциферов, С. П. Косогор, Ю. Л. Семенов, В. Л. Гурбич

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию сильнооточного низковольтного разряда, реализуемого в глубоком вакууме и развивающегося в парах материала катода, эродирующего в микропятнах [¹⁻³].

Известно, что эрозия поверхности катода вакуумной дуги осуществляется под воздействием катодных пятен, природа которых в настоящее время до конца не установлена [⁴]: по-видимому, эрозия в них происходит за счет последовательных взрывов и связана с генерацией ионов, нейтрального пара и микрокапельной части материала катода. Основными продуктами эрозии катода являются ионы и капли, причем эрозия в капельной фазе увеличивается с ростом величины заряда, переносимого через единицу площади.

Анализ результатов исследований капельной фазы показывает, что все данные получены при эрозии катодов, выполненных из литых материалов с поверхностями, обладающими усредненными эффектами, характерными как для гладких, так и шероховатых поверхностей.

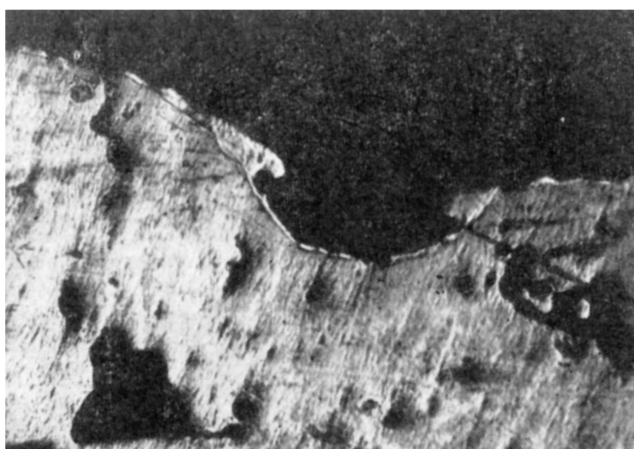


Рис. 1. Рельеф поверхности эрозионного порошкового катода.

В работе [⁵] указывается, что катоды с шероховатой поверхностью могут оказывать влияние на различные процессы, такие как распределение электрического поля, теплопередача, ионизация плазмы и испарение. Но влияние шероховатости поверхности катода на фазовое распределение плазменного потока не рассматривалось.

В связи с этим представляет интерес исследование капельной фазы эрозии спеченного катода стационарной вакуумной дуги с развитой поверхностью, близкой к шероховатой, обладающей микровыступами и впадинами.

В настоящей работе исследована стационарная (время горения $9 \cdot 10^3$ — $3.6 \cdot 10^3$ с) низковольтная вакуумная дуга, горящая на титановом спеченном катоде из порошкового материала марки ПТЭС с пористостью 8—10 %, при наличии азота в объеме разрядного промежутка. Для сравнительной количественной оценки капельной фазы использовали литой катод из титана марки ВТ1-00.

Исследования проводили на экспериментальной установке с холловским ускорителем. Ток дугового разряда 100 А.

Перед нанесением покрытий поверхность образцов подвергали катодному распылению путем бомбардировки высокоэнергетическими ионами титана при подаче на подложку отрицательного потенциала порядка 1.1 кВ. В процессе конденсации покрытий отрицательный потенциал подложки поддерживали на уровне 250 В.

Исследование капельной фазы в объеме конденсата и рельефа поверхности эродирующего катода проводили на оптическом микроскопе «Neophot-21». Толщина покрытий 16—18 мкм.

Скорость конденсации покрытия рассчитывали по толщине покрытия и времени нанесения. Скорость эрозии катода определяли по измерению убыли веса электрода и времени нанесения.

Как показывают оценки, эрозия катодов, выполненных из литых материалов, осуществляется в быстропеременяющихся микропятнах и происходит в основном за счет проплавления металла под пятном и выдавливания расплавленной пленки большим давлением $P \approx 300$ атм [2], существующим в плазме у основания катодной струи.

Эрозионная поверхность катодов характеризуется беспорядочными углублениями, волнистыми участками и следами брызг, размеры которых находятся преимущественно в диапазоне 10—100 мкм [4].

На рис. 1 представлена микрофотография рельефа поверхности спеченного катода, которая состоит из характерных эффектов — микровыступов и впадин.

По мере эрозии поверхности рельеф непрерывно изменяется благодаря существованию пор в материале катода. Размеры микровыступов и впадин находятся в пределах от нескольких мкм до $1.5 \cdot 10^{-1}$ мм. Присутствие распыленной жидкой фазы металла в порах материала катода позволяет предположить, что разрушение поверхностной структуры происходит расплавлением металла в виде пленки толщиной 10—100 мкм и внедрением жидкой фазы в поры металла, что приводит к уменьшению капельной фазы в плазменном потоке. На рис. 2 представлен механизм разлета капельной фазы при наличии пор в материале катода на основе выдвинутой Любимовым [6] гипотезы о газодинамическом ускорении катодной струи. При толщине прослойки между микропятном и порой в материале, недостаточной для ее проплавления, разлет частиц, микрокапель идет, как и в литых материалах, в радиальном направлении, имеющем угол разлета 180° . С уменьшением толщины происходит проплавление и разрыв прослойки. Под действием высокого давления, существующего в плазме у катодной струи, угол разлета частиц, микрокапель увеличивается до 360° и жидкая фаза металла ускоряется как в сторону плазменного потока, так и в объем поры металла с кристаллизацией жидкой фазы по поверхности. Уменьшение тепловода прослойки приводит к увеличению количества расплавленной фазы и оплавлению краев открытой поры. Размеры оплавлений достигают 50 мкм и превышают размеры закристаллизованной жидкой фазы на поверхности и в порах катода.

Рис. 2. Разлет капельной (жидкой) фазы в катодной струе (схематически).

а — микропятно над беспористым материалом, б — над порой материала, в — вблизи поры материала.

При непосредственной близости микропятна от пор угол разлета изменяется от 180 до 360° . Механизм разрушения поверхностной структуры происходит разбрызгиванием и стеканием жидкой фазы по поверхности и в поры металла. Данный эффект кристаллизации жидкой фазы в порах металла, характерный для порошковых катодов, при эрозии стационарной вакуумной дуги способствует уменьшению количества микрокапель в объеме конденсата по сравнению с эрозией катода литых материалов при равной скорости эрозии катодов $5 \cdot 10^{-2}$ г/с и скорости осаждения конденсата $4.4 \cdot 10^{-3}$ мкм/с. Данные подтверждаются микроскопическим изучением капельной фазы в объеме конденсата, которые показывают, что количество генерируемых дугой жидких капель уменьшается в два раза по сравнению с литым катодом при одинаковых технологических режимах нанесения покрытий. Количество капель в зависимости от размеров в объеме конденсата и тока дуги приведено в таблице.

Материал катода	Ток дуги, А	Количество		
		5 — 3	3 — 1	1 — 0.5
		диаметр капель, мкм		
Спеченный титан из порошка «марки ПТЭС»	80	1	3	27
	100	1	6	25
	120	2	11	38
Литой титан марки ВТ1-00	80	2	10	44
	100	4	12	49
	120	5	18	61

Для точного количественного определения капельной фазы, попадающей на поверхность образца, конденсированные покрытия подвергали жидкостному травлению водным раствором с концентрацией плавиковой кислоты $\text{HF} — 49\%$. Минимальные из обнаруженных капель имеют диаметр 0.5 мкм. При осаждении на подложку капли имеют круглую полусфериче-

скую форму; с увеличением размеров капли приобретает плоскую форму. Распределение капель по размерам описывается функцией типа

$$\Delta n = cD_k^\gamma,$$

Δn , D_k — количество и диаметр капель; c , γ — постоянные, зависящие от давления газа в объеме и угловой координаты.

Проведенные исследования позволяют сделать выводы, что при эрозии микропятнами катодов с пористостью 8—10 % стационарной вакуумной дуги угол разлета микрокапельной фазы достигает 360° на поверхности катода. В парах порошкового катода с данной пористостью происходит частичная кристаллизация жидкой фазы, которая приводит к уменьшению количества микрокапель в объеме конденсата в 2 раза в сравнении с эрозией литых катодов.

Литература

- [1] Немчинский В. А. ЖТФ, 1979, т. 49, № 7, с. 1379—1384.
- [2] Мойжес В. Я., Немчинский В. А. ЖТФ, 1984, т. 54, № 1, с. 13—18.
- [3] Аксенов И. И. и др. ЖТФ, 1984, т. 54, № 8, с. 1530—1534.
- [4] Мойжес В. Я., Немчинский В. А. ЖТФ, 1980, т. 50, № 1, с. 78—86.
- [5] Еккер. В кн.: Вакуумные дуги. Теория и приложения. М.: Мир, 1982. 269 с.
- [6] Любимов Г. А., Раховский В. И. УФН, 1978, т. 125, № 4, с. 665—703.

Пермский политехнический институт
Республиканский инженерно-технический
центр порошковой металлургии

Поступило в Редакцию
15 апреля 1987 г.
В окончательной редакции
8 февраля 1988 г.

УДК 537.311.331

Журнал технической физики, т. 58, в. 8, 1988

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ InSb, ПОДВЕРГНУТОГО ЛАЗЕРНОМУ ОТЖИГУ В СРЕДЕ ЖИДКОГО АЗОТА

Г. Г. Громов, А. Вернер, К. В. Руденко, В. А. Семенюк, В. Б. Уфимцев

Ранее в работе [1] сообщалось о наносекундном лазерном отжиге ($\lambda = 1.064$ мкм, $\tau = 10$ нс) антимонида индия в среде жидкого азота, приводящем к увеличению коэффициента отражения облученной поверхности R до 56 %. Причем в послеимпульсный период выдержки образцов в нормальных условиях происходила полная релаксация R до значения $R_{\text{InSb}} = 46.2$ % ($\lambda = 0.63$ мкм). В ряде работ, например [2, 3], также наблюдался рост коэффициента отражения поверхности полупроводников (Si, GaAs, InP) после короткоимпульсного лазерного отжига, что было связано с аморфизацией поверхностного слоя.

По аналогии с данными работами можно предположить, что при лазерном отжиге InSb в жидком азоте также происходит структурное превращение. Однако ряд наблюдающихся особенностей высокоотражающей фазы на InSb (несвойственная для аморфного InSb нестабильность) требует проведения дальнейших исследований.

Для детального изучения особенностей релаксации высокоотражающей фазы в настоящей работе методика измерения динамики R [1] дополнена термостатированием образца в послеимпульсный период времени в инертной среде (Ar) при различных температурах для определения температурной зависимости скорости релаксации. Кроме того, исследовалось изменение удельной плотности в слое отожженного InSb, для чего применен метод профилометрии поверхности (профилометр TALLYSTEP фирмы «TAYLOR—HOBSON» с высоким разрешением ~ 10 Å). Изучались изменение профиля поверхности InSb, отожженного в жидком азоте при различных плотностях энергии лазерного воздействия, а также его динамика в послеимпульсный период в сопоставлении с релаксацией R . Для определения толщины поверхностной области, претерпевшей фазовое превращение, применялся метод селективного химического травления отожженного InSb до полного удаления высокоотражающей фазы, что контролировалось по изменению R (схема метода аналогична [4]) с последующей профилометрией.