

Таким образом, проведенный расчетный анализ показал, что при усилении «длинных» импульсов ($\tau_I \gg \tau_3$) даже на небольших трассах возможно «тепловое распыление» усиливаемого луча. Тепловая дефокусировка пучка может быть ослаблена уменьшением длительности импульса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выслоух В. А., Огнев Л. И. Численное исследование тепловой дефокусировки в импульсном CO_2 -усилителе. — Квант. электроника, 1981, т. 8, № 6.
2. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981.
3. Бирюков А. С. Кинетика физических процессов в газодинамических лазерах. — Тр. ФИАН СССР, 1975, т. 83, с. 13.
4. Гордиенко В. М., Горшков В. А. и др. Кинетическое охлаждение газов $\text{CO}_2 - \text{N}_2$ излучением CO_2 -лазера. — ЖЭТФ, 1977, т. 73, вып. 3(9).
5. Лосев С. А. Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977.
6. Британ А. Б., Старик А. М. Исследование колебательно-неравновесного течения в клиновидном сопле смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$. — ПМТФ, 1980, № 4.
7. Herzfeld K. F. Deactivation of vibrations by collisions in the presence of Fermi resonance. — J. Chem. Phys., 1967, vol. 47, p. 743.
8. Сухоруков А. П. Тепловая самофокусировка световых пучков. — В кн.: Нелинейные процессы в оптике. Новосибирск: Наука, 1970.
9. Луговой В. Н., Прохоров А. М. Теория распространения мощного лазерного излучения в нелинейной среде. — УФН, 1973, т. 111, вып. 2.
10. Лоудон Р. Квантовая теория света. М.: Мир, 1976.
11. Strohbehn J. W. Laser beam propagation in the atmosphere. — In: Topics Appl. Phys. Vol. 25. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
12. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.

Поступила 6/II 1984 г.

УДК 621.374.2 : 621.762

ЭРОЗИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ВОДЯНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

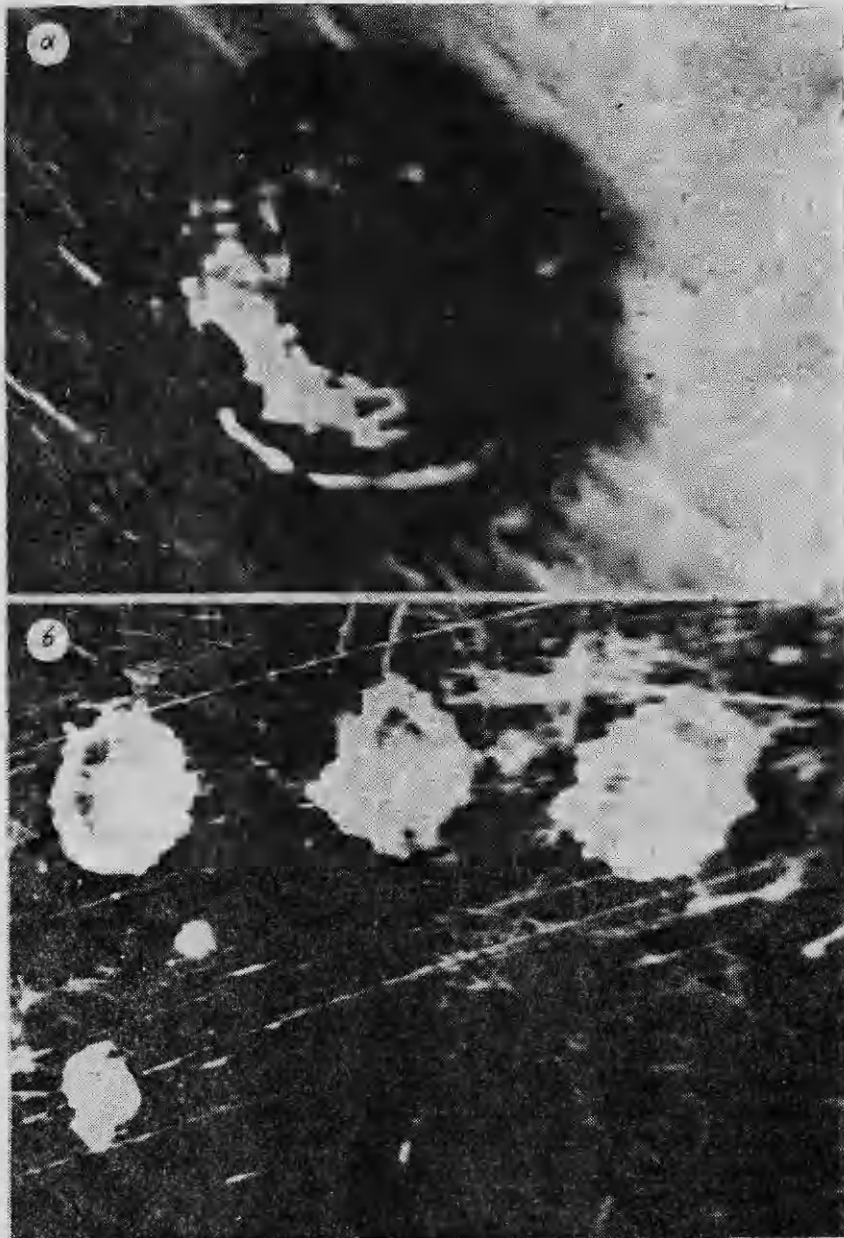
Н. К. Капшиников, В. М. Муратов, В. Я. Ушаков

(Томск)

Эрозия электродов под действием электрического разряда в жидкости как фактор, ограничивающий ресурс работы силовой отключающей аппаратуры, или как основа рабочего процесса в электроискровой и электроэрозионной технологии на сегодня изучена достаточно хорошо при колебательной форме импульса тока длительностью $10^{-6} - 10^{-2}$ с и сравнительно невысокой мощности ($< 10^7$ Вт), развиваемой в разрядном канале [1—3]. Интенсивное развитие в последние годы мощной высоковольтной импульсной техники и широкое использование в схемах формирования импульсов высоковольтных искровых разрядников с жидкой изоляцией делает актуальными вопросы эрозионной стойкости электродов таких разрядников, режим работы которых характеризуется малым временем ($10^{-9} - 10^{-7}$ с) и большой скоростью ($10^7 - 10^{12}$ Вт) выделения энергии в канале разряда. В литературе практически отсутствуют результаты исследований эрозии электродов в таких режимах.

В данной работе исследована эрозия электродов высоковольтных высоковольтных разрядников с водяной изоляцией при длительности импульса коммутлируемого тока $10 - 45$ нс и развиваемой в канале разряда мощности $10^7 - 10^{10}$ Вт.

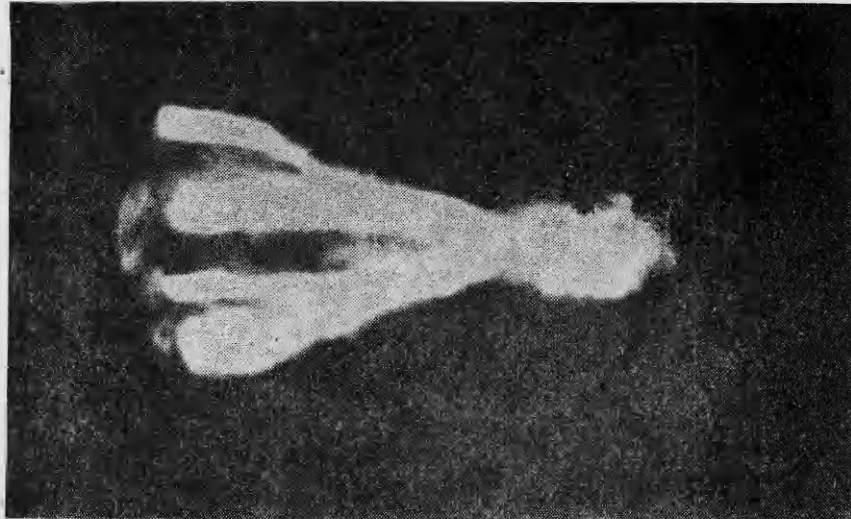
Разрядники коммутировали коаксиальные формирующие линии с волновым сопротивлением $3,5 - 100$ Ом, заряжаемые до напряжения $50 - 1000$ кВ. Амплитуда разрядного тока составляла $1 - 150$ кА. Длина межэлектродного зазора разрядников изменялась от $0,4$ до 6 см. В качестве основного количественного показателя эрозии электродов выбран объем выброшенного с поверхности электродов металла, наиболее полно характеризующий изменение формы электродов высоковольтных разрядников и позволяющий оценить срок их службы. Для оценки характера и количественных показателей эрозии использован микроскоп установки МКУ-1. Объем металла V , выброшенного с поверхности электродов, оценивался расчетным путем при аппроксимации эрозионного кратера шаровым сегментом. Как показало контрольное взвешивание с последующей оценкой V (данные исследования проведены с использованием модельных электродов), расчет по формуле для объема шарового сегмента дает достаточно



Ф и г. 1

точное значение объема металла, выброшенного с поверхности электродов (расхождение не превышает 10—20%). Исследована эрозия электродов из таких материалов: нержавеющей стали марки 12X18H10T, титана, тантала, вольфрама, кирита (30% меди, 70% вольфрама), латуни марки Л62, меди, алюминия, магния и свинца.

Установлено, что интенсивность эрозии зависит не от полярности электрода, а от того, является ли он «активным» или «пассивным» («активным» согласно принятой в работе терминологии называется электрод, на котором начинается формирование разряда). В режиме одноканальной коммутации после срабатывания разрядника на «активном» электроде образуется четко выраженный эрозионный кратер (фиг. 1, а), форма которого близка к шаровому сегменту. На противоположном электроде образуется несколько (2—5, а иногда и более) слабо выраженных кратеров (фиг. 1, б). Такое различие в характере эрозионного разрушения электро-



Ф и г. 2

дов объясняется разветвлением центрального ствола канала пробоя после прохождения им пути, равного примерно половине длины межэлектродного промежутка разрядника, на несколько ветвей, часть из которых участвует в коммутации тока (фиг. 2).

На фиг. 3 приведена зависимость объема металла V_a , выброшенного с поверхности «активного» электрода, от количества электричества q , протекающего через канал разряда за одно срабатывание разрядника. Оценка количества электричества, пропускаемого каналом разряда, осуществлялась по осциллограммам разрядного тока. Типичная осциллограмма приведена на фиг. 4.

Зависимости фиг. 3 для «активного» электрода можно описать выражением вида

$$(1) \quad V_a = kq^n,$$

где n — безразмерный параметр, практически не зависящий от материала электродов и приблизительно равный 1,3; k — коэффициент, определяемый материалом электродов. Для электродов из нержавеющей стали $k \approx 100$ (q в К, V_a в мм³).

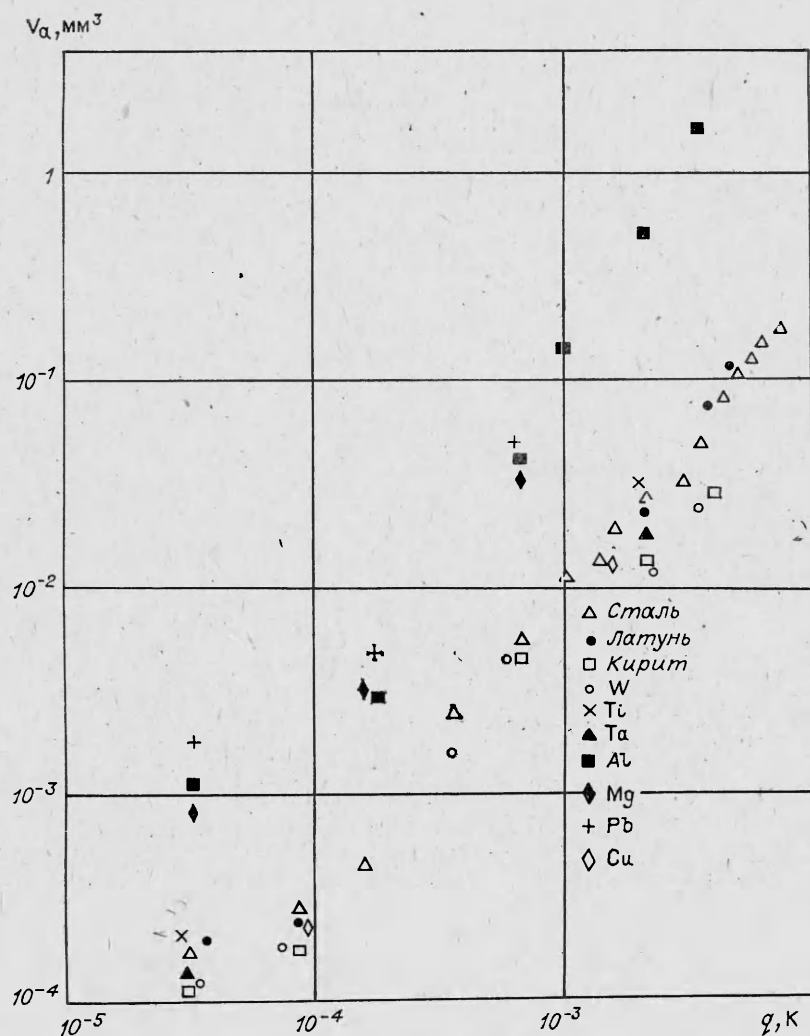
Объем металла, выброшенного с поверхности «пассивного» электрода, может быть найден из выражения

$$(2) \quad V_{\Pi} = k \sum_{i=1}^m q_i^n,$$

где q_i — количество электричества, пропускаемого отдельной ветвью разрядного канала; n и k имеют те же значения, что и для «активного» электрода; m — число ветвей, участвующих в коммутации.

Из выражений (1), (2) следует, что при разветвлении канала разряда ввиду того, что $n > 1$, V_a всегда больше V_{Π} . Это обуславливает меньший эрозионный износ «активного» электрода многоканальных водяных разрядников по сравнению с одноканальными, на что указывается в [4]. При этом объем металла, выброшенного с поверхности электродов, в значительной степени зависит от характера распределения тока по разрядным каналам. Минимальный эрозионный износ электродов наблюдается при равномерном распределении тока по всем разрядным каналам. В этом случае объем металла, выброшенного с поверхности «активного» электрода, равен

$$(3) \quad V_a = kN(q_{об}/N)^n,$$



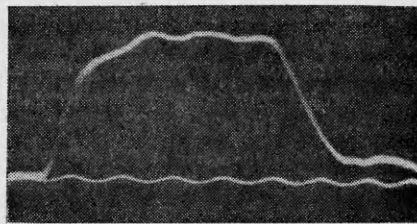
Ф и г. 3

где $q_{\text{об}}$ — суммарное количество электричества, пропускаемое разрядником; N — число разрядных каналов, участвующих в коммутации.

В более общем случае при многоканальном пробое, когда распределение тока по разрядным каналам отличается от равномерного, V может быть оценен из выражения (2).

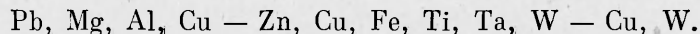
При замене воды на трансформаторное масло в сопоставимых условиях эрозия электродов практически не изменяется и для оценки V применимы выражения (1) — (3). Экспериментальная проверка показала, что погрешность расчета по выражениям (1) — (3) не превышает 20%.

При исследовании электрической эрозии электродов обычно вводятся критерии эрозионной стойкости и составляются эрозионные ряды, с помощью которых можно априорно выбирать материалы электродов, сравнивая их по эрозионной стойкости. Общего критерия эрозионной стойкости, пригодного для всех режимов работы электродов, не существует. Это связано с тем, что с изменением режима работы электродов меняется и режим нагрева металла, определяющий электрическую эрозию, в результате чего изменяются не только количественные показатели эрозии, но и взаимное поло-



Ф и г. 4

жение металлов в эрозионных рядах [3]. Полученный в данной работе эрозионный ряд имеет вид



Из известных в литературе критериев эрозионной стойкости наиболее распространенными являются критерий Л. С. Палатника [5] и критерий, предложенный в [6], согласно которым стойкость материала электродов определяется выражениями $\lambda c \nu T_{\text{пл}}$ и $c T_{\text{пл}} / (k_{\text{в}} U'_{\text{э}})$, где λ — коэффициент теплопроводности; c — удельная теплоемкость; ν — плотность; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления; $k_{\text{в}}$ — коэффициент выброса металла; $U'_{\text{э}}$ — эквивалентное приэлектродное падение напряжения. Применение этих критериев для исследованного в данной работе режима эрозии показывает, что они не описывают полученного эрозионного ряда. Например, по критерию Л. С. Палатника медь имеет более высокую эрозионную стойкость, чем титан, а по критерию, предложенному в [6], V для электродов из меди и титана должен быть примерно одинаков, тогда как, согласно полученным данным, V для электродов из титана почти в 2 раза меньше, чем для электродов из меди.

В сильноточных водяных разрядниках, коммутирующих формирующие линии, эрозионная стойкость электродов достаточно хорошо коррелирует с температурой плавления материала (при доверительной вероятности 0,95 с погрешностью 0,1 коэффициент корреляции равен $\sim 0,8$), которую и можно принять за критерий их эрозионной стойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Физика искрового способа обработки металлов. М.: ЦБТИ Минэлектротехпром СССР, 1946.
2. Золотых Б. Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. М.: Гостехиздат, 1953.
3. Буткевич Г. В., Белкин Г. С., Ведешенков Н. А., Жаворонков М. А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978.
4. Балалаев В. В., Капшинников Н. К. и др. Управляемые многоканальные разрядники с водяной изоляцией. — ПМТФ, 1978, № 5.
5. Палатник Л. С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий. — ДАН СССР, 1953, т. 89, № 3.
6. Белкин Г. С., Киселев В. Я. Влияние материала электродов на эрозию при сильных токах. — ЖТФ, 1967, т. 37, вып. 5.

Поступила 1/II 1984 г.

УДК 541.126

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАЗРЕШЕНИИ И ТОЧНОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ФАЗОВЫХ МИКРООБЪЕКТОВ

В. Ф. Климкин, Г. С. Ломакин

(Новосибирск)

В настоящее время оптические методы регистрации получили существенное развитие в связи с исследованиями физических процессов в газах, жидкости и в высокотемпературной плазме с предельным временным и пространственным разрешением [1]. Одним из основных элементов оптической установки является оптическая система, формирующая изображение исследуемого объекта на экране. Из-за дифракции, аберраций, неточности фокусировки происходит размазывание краев каждой детали объекта, что ограничивает разрешающую способность и точность измерений. В связи с этим анализ пространственного разрешения проводился в ряде работ (например, [2, 3]). Однако, как правило, рассматривалось несовершенство изображений, связанное с дифракцией света, хотя в большинстве практических случаев пространственное разрешение определяется погрешностями (аберрациями) оптических элементов. Дифракционная теория Аббе образования оптических изображений [4] развита для плоских периодических структур, в то время как реальные объекты являются более сложными, трехмерными. Свет, падающий на такой объект, отражается, рассеивается и проходит, что может приводить к изменению и усложнению дифракционной картины рас-