



УДК 621.791.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ ИСТОЧНИКОВ НАГРЕВА

**В. А. Шаповалов, Т. И. Грищенко, М. С. Приходько,
К. А. Цыкуленко, Г. А. Мельник, О. М. Вислобоков,
В. С. Константинов, Д. М. Жиров, В. И. Колесниченко**

Рассмотрено изменение структуры материала электродов под воздействием различных технологических параметров в процессе эксплуатации. Определено влияние тока, продолжительности работы и формы электрода на характеристику микроструктуры электродного материала. Полученные результаты имеют важное практическое значение для создания дуговых нагревателей с высоким ресурсом работы электродов.

Change in structure of material of electrodes under the effect of different technological parameters during service was considered. The effect of current, duration of operation and shape of electrode on characteristic of electrode material microstructure was defined. The obtained results are practically important for the development of arc heaters with a high service life of electrodes.

Ключевые слова: медь; ток; длительность эксплуатации; температура; форма электрода; структура материала электрода

При переплаве высокочистых металлов и специальных сплавов плазменными или электродуговыми источниками нагрева использование электродов из тугоплавких металлов, например вольфрама, молибдена или графита, зачастую бывает нецелесообразным, поскольку переплавляемый металл насыщается материалом электрода, что приводит к ухудшению его физико-механических свойств. В этих случаях оправдано применение медных водоохлаждаемых электродов, так как медь слабо влияет на свойства многих переплавляемых металлов.

Под влиянием высоких температур в материале электрода, в первую очередь вблизи поверхности привязки дуги, происходит процесс рекристаллизации, заключающийся в росте зерен и превращении мелкозернистой структуры в крупноблочную [1, 2]. Зона столбчатых кристаллов со временем распространяется в глубь электрода. В ней появляются большие газовые поры, диффундирующие к поверхности. При этом происходит сегрегация примесей на границах зерен, которая может привести к ухуд-

шению охлаждения поверхности, образованию легкоплавких эвтектик и трещин, а затем к прогару и аварийным ситуациям.

В литературе большое внимание уделяется эрозии медных водоохлаждаемых электродов [3–6], однако практически отсутствуют данные об изменениях их структуры. Поэтому определение условий эксплуатации дуговых источников нагрева, позволяющих избежать опасных структурных превращений в материале электрода, имеет важное практическое значение.

Проведена серия экспериментов с целью получения образцов для исследования изменений структуры материала электродов (меди) под воздействием различных технологических параметров в процессе плавки.

Первые образцы электродов конической формы исследовали в плазмотроне с постоянным током 300 А, напряжением на дуге 35 В при длине дуги 30 мм. В качестве плазмообразующего газа служил атмосферный воздух. Эксперименты показали низкую стойкость электродов в воздушной атмосфере. Последующая эксплуатация электродов, даже при интенсивном охлаждении, была нецелесообразна в связи с интенсивной эрозией меди.



Рис. 1. Размещение электродов в камере

В дальнейшем создали установку для проведения экспериментов, представляющую собой герметичную водоохлаждаемую камеру, в верхней части которой на изоляторах устанавливали водоохлаждаемый электродный узел с испытуемым медным наконечником (диаметр 50 мм), изготовленным из меди М1. Конструкция установки позволяла перемещать электрод по вертикали и, таким образом, изменять длину дуги. Электрод подключали к положительному полюсу источника питания постоянного тока с уровнем тока до 500 А и напряжением холостого хода до 100 В.

Через патрубки к электродному узлу под давлением 0,2 МПа подавали воду для охлаждения медного анода. В днище камеры разместили водоох-



Рис. 2. Процесс работы электродов

Таблица 1. Температура рабочей части электродов различной конфигурации при разных тепловых нагрузках

Форма рабочей части электрода	Толщина электрода в зоне размещения активного пятна, мм	Температура в зоне активного пятна, °С	Ток дуги, А
Коническая	22	204	150
	22	383	300
	22	477	400
	10	173	150
	10	321	300
	10	419	400
Полусферическая	22	208	208
	22	287	287
	22	340	340
	10	196	196
	10	261	261
	10	304	304
Цилиндрическая	22	178	150
	22	331	300
	22	433	400
	10	148	150
	10	271	300
	10	354	400

лаждаемый поддон, подключенный к отрицательному полюсу источника питания. Для улучшения эмиссионных свойств катода, позитивно влияющих на стабильность горения дуги, на графитированной изложнице, находящейся на поддоне, установили стержень из иттрированного вольфрама (рис. 1).

В процессе проведения экспериментов плазменную установку герметизировали, в камеру подавали аргон, расход которого регулировали в пределах 3...5 л/мин. После продувки камеры в течение 15 мин в узлы установки подавали охлаждающую воду и с помощью осциллятора поджигали дугу.

Первые два образца электродов конической формы испытывали с целью определения влияния продолжительности работы и значения тока на изменение структуры материала. Один образец получили после воздействия постоянного тока 150 А в течение 250 ч. Другой находился под воздействием тока в 300 А в течение 230 ч до момента его прогара и разгерметизации системы охлаждения.

Таблица 2. Результаты оценки размера зерна электродов

№ образца	Форма рабочей части электрода	Длительность работы электрода, мин	Ток, А	Балл зерна
1	Коническая	13920	300	1
2	»»	4500	400	1
3	»»	15000	150	1
4	Полусферическая	4500	400	1, 2
5	Цилиндрическая	4500	400	1, 2, 3



Рис. 3. Микроструктура ($\times 100$) электродов цилиндрической (а), сферической (б) и конической (в) форм

Для исследования влияния формы электродов на изменение структуры их материала в процессе эксплуатации следующие три электрода (конической, цилиндрической и полусферической форм) испытывали при одинаковых режимах работы. Для ускорения процесса рекристаллизации постоянный ток увеличили до 400 А, поэтому электроды работали лишь по 75 ч каждый (рис. 2)

Из всех полученных образцов электродов изготовили шлифы для дальнейшего изучения структурных изменений их материала.

Проведены аналитические исследования температуры рабочей части электродов с разной конфигурацией. В основу методики, предложенной для расчета, положена схема распределения тепловых потоков в теле электродов от торцевой части к воде с учетом их распределения как непосредственно на торце, так и на боковой части электродов.

Значения температуры рабочей части электродов различной конфигурации при разных тепловых нагрузках представлены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, при одинаковых тепловых нагрузках наиболее низкая температура в зоне активного пятна зафиксирована у электродов цилиндрической формы. Это можно объяснить

большой массой тела электрода, а также тем, что в отводе тепла принимает участие его боковая поверхность, а зона активного пятна растекается по поверхности электрода.

Полученные данные о значениях температуры электродов различной конфигурации хорошо коррелируют с анализом изменения их микроструктуры.

Медь имеет поликристаллическую структуру. В ходе нагревания меди, как и других металлов, происходит процесс рекристаллизации, в результате которого появляется новая структура, характеризующаяся размером зерна [7, 8]. Воздействие активного пятна дуги, образующей тепловые поля в теле электрода, можно рассматривать как рекристаллизационный отжиг материала электрода.

Одной из важнейших характеристик отожженного металла является размер рекристаллизованного зерна. Основные факторы, влияющие на размер зерна отожженного металла — температура и длительность отжига. В нашем случае это распределение температур в торцевой части электродов и продолжительность горения дуги.

Для металлографических исследований вырезали образцы из торцевой части электродов, подвергаемые непосредственно воздействию дуги. Электроды имели коническую, сферическую и цилиндрическую форму, работали в различных электрических режимах и разное время. Из этих образцов изготовляли микрошлифы. Для определения микроструктуры в качестве реактива использовали концентрированную азотную кислоту. Размер зерна на образцах электродов оценивали баллом зерна по шкале 3 ГОСТ 5639–82. Результаты оценки размера представлены в табл. 2.



Рис. 4. Внешний вид электрода после прогара



Рис. 5. Темплет разрушенного электрода

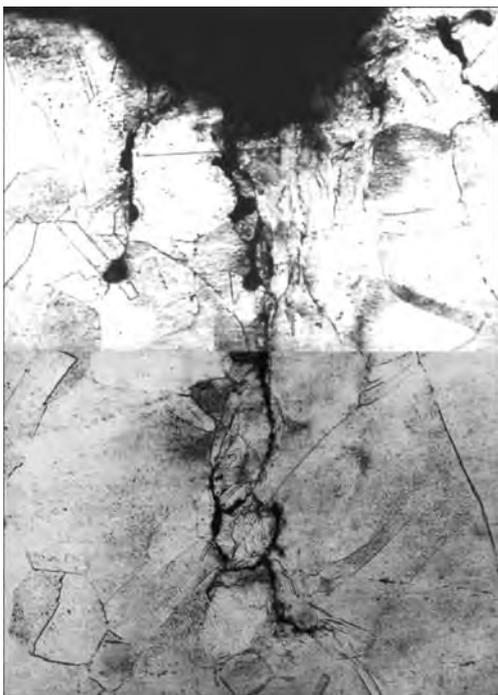


Рис. 6. Микроструктура (X500) разрушенного электрода

При исследовании микроструктуры образцов учитывали разное время нахождения электродов под воздействием температур, вызывающих рекристаллизационные процессы в меди. В микроструктуре образцов № 4 и 5 обнаружена разнотернистость (балл зерна 1, 2, 3). Это свидетельствует о том, что процесс собирательной рекристаллизации начался, но далек от завершения (рис. 3). Микроструктура образца № 2 достаточно равномерна и имеет балл зерна 1. Этот электрод находился достаточно длительное время (4500 мин) при температуре 400...500 °С, поэтому можно сделать вывод о том, что процесс собирательной рекристаллизации прошел по всему объему металла.

При значительном повышении температуры металла электрода и длительном пребывании в таком состоянии повышается скорость диффузии, что приводит к возникновению сегрегации на границе зерен примесей, проникновению кислорода по границам зерен по всему сечению электрода в зоне активного пятна и образованию оксидов на границах между зернами.

Эти процессы способствуют образованию трещин вдоль границ зерен и разрушению электрода. Поэтому в качестве материала электрода следует выбирать бескислородную медь, содержащую минимальное количество неметаллических включений, которые в процессе нагрева и последующей рекристаллизации материала электрода могут приводить к его разрушению.

Исследования поверхности прогоревшего электрода конической формы (рис. 4) и темплета участка прогара (рис. 5) позволили установить наличие трещин, проникших в тело электрода.

Металлографические исследования микроструктуры (рис. 6) показали, что границы зерен утолщены. Трещины, приводящие к разрушению электрода, зарождаются и развиваются вдоль границ между зернами.

Таким образом, анализ соотношений аналитических исследований значений температуры электродов, работающих при различных технологических режимах, и изменения микроструктуры позволяет рекомендовать в качестве материала электрода использование бескислородной меди, а при создании конструкции электрода — цилиндрической формы как наиболее оптимальной.

1. *Термохимические катоды* / М. Ф. Жуков, А. В. Пустогаров, Г.-Н. Дандарон, А. Н. Тимошевский. — Новосибирск: СО АН СССР, Ин-т теплофизики, 1985. — 130 с.
2. *Приэлектродные процессы в дуговых разрядах* / М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров и др. — Новосибирск: Наука, 1982. — 160 с.
3. *Гонопольский А. М., Кораблев В. А.* Экспериментальное исследование эрозии электродов серийных плазмотронов для напыления // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1983. — 3, № 1. — С. 69–71.
4. *Эрозия медно-вольфрамовых анодов в линейных плазмотронах* / А. С. Аньшаков, М. Ф. Жуков, Г. А. Горлев и др. // Там же. — 1981. — 3, № 1. — С. 68–70.
5. *Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А.* Прикладная динамика термической плазмы. — Новосибирск: Наука, 1975. — 298 с.
6. *Раховский В. И.* Эрозия электродов в контрагированном разряде // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1975. — 3, № 1. — С. 11–27.
7. *Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А.* Металлография цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1960. — 372 с.
8. *Новиков И. И.* Теория термической обработки металлов. — М.: Металлургия, 1974. — 400 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 08.01.2009