



ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ СВАРКИ

Г. П. БОЛОТОВ, канд. техн. наук (Черниг. гос. технолог. ун-т)

Определено влияние катодных процессов на устойчивость тлеющего разряда. Показано, что в условиях нагрева сильноточным тлеющим разрядом наличие на поверхности анода неоднородных диэлектрических пленок вследствие его загрязнения в процессе работы приводит к образованию на аноде локальных участков с повышенной плотностью тока, наличие которых способствует переходу тлеющего разряда в дуговой.

Ключевые слова: электроды, низкотемпературная плазма, тлеющий разряд, устойчивость, состояние поверхности

Низкотемпературная плазма тлеющего разряда среднего (1...15 кПа) давления, горящего в инертных или активных газах, успешно используется в качестве источника энергии в технологических процессах, сопровождающихся существенным длительным нагревом изделий — при химико-термической обработке, диффузионной сварке и пайке. Обрабатываемые или соединяемые детали в этих процессах являются одним из электродов разряда — катодом. Через катодное пятно на их поверхности осуществляется нагрев.

В то же время тлеющий разряд не отличается достаточной устойчивостью и при определенных условиях переходит в электрическую дугу. В возникающих при этом локальных пятнах нагрева возрастает концентрация энергии, что приводит к прожогам и оплавлению отдельных участков соединяемых деталей с образованием неисправимых дефектов. Для электрических разрядов в газах особо важными являются процессы, происходящие на катоде и в прикатодной области.

В настоящее время в многочисленных исследованиях [1–3], касающихся проблемы устойчивости тлеющего разряда, рассматривается в основном влияние катодных процессов на форму разряда. Установлено, что вероятность перехода тлеющего разряда в электрическую дугу определяется характеристиками поверхностного слоя материала катода (химическим составом, микрорельефом, наличием оксидных пленок и загрязнений, обеспечивающих существование точек повышенной эмиссии электронов), а также формированием на катоде щелей и зазоров определенного размера, где возможно появление эффекта полого катода со значительным локальным возрастанием плотности тока. Обработка деталей по 3–5-му классу чистоты, промывка их в растворителях, устранение из зоны

нагрева щелей и зазоров размером 0,01...1,00 мм являются достаточными мерами для того, чтобы избежать перехода тлеющего разряда в дуговой.

В [4] показано, что при геометрии электродов, используемых при сварке в тлеющем разряде (стальной проволоочный контур–анод и относительно массивные детали–катод), плотность тока в прианодной области в 5...8 раз больше, чем на катоде, что делает эту область весьма чувствительной к локальным флуктуациям плотности тока и может влиять на устойчивость разряда даже при отсутствии неблагоприятных факторов на катоде.

Замечено, что в процессе работы вначале слабое равномерное анодное свечение постепенно изменяет свое состояние. На аноде появляются отдельные светящиеся пятна, расположенные произвольно (рис. 1, вверху, а), из которых с течением времени начинают формироваться каналы повышенной проводимости (рис. 1, вверху, б). Увеличение тока разряда приводит к развитию в этих каналах электрической дуги (рис. 1, вверху, в). Это вызвано тем, что в процессе работы состояние поверхности анода существенно изменяется вследствие осаждения на ней полимеризовавшихся в разряде паров масел, попадающих в камеру из вакуумных насосов и трубопроводов, окисления поверхности анода из-за наличия в газах примесей кислорода, осаждения на аноде частиц материала катода, распыленных ионной бомбардировкой. Все это приводит к появлению на поверхности анода неконтролируемых пленок, имеющих более высокое, чем материал анода, сопротивление и способствующих замыканию тока тлеющего разряда на аноде.

Исследование характера проводимости тока на поверхности анода (рис. 2, а) выполняли с помощью метода вращающегося зонда с записью результатов на светолучевом осциллографе. Анод выполнен из отрезка прутка из стали Ст3 диаметром 0,005 м и длиной 0,05 м. Для имитации состояния поверхности анода, возникающего в

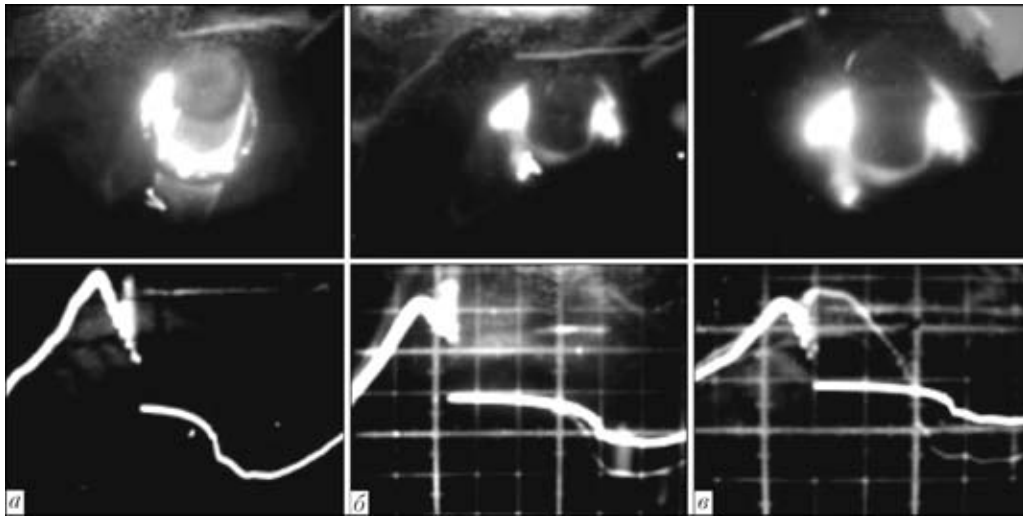


Рис. 1. Характер изменения внешнего вида анодного свечения в процессе работы анода тлеющего разряда (вверху) и осциллограммы разрядного тока (внизу): а–в — см. в тексте

в процессе его работы, анод подвергали окислению на воздухе при температуре 873...973 К в течение 10 мин до образования заметного слоя оксидов. После этого поверхность анода в двух местах зачищали до металлического блеска. Траектория движения рабочего конца зонда располагалась на расстоянии 1,0...1,5 мм от поверхности анода. Из полученных осциллограмм (рис. 2, б) видно, что значительная доля тока разряда поступает на анод именно через участки, свободные от поверхностных загрязнений. Это приводит к повышению локальной плотности тока на аноде и соответственно в примыкающих к нему областях положительного столба разряда.

При увеличении мощности разряда на осциллограммах разрядного тока появляются высокочастотные колебания, наблюдающиеся в момент, следующий за переходом кривой тока через амплитудное значение (см. рис. 1, внизу, а). Измерение частоты следования этих импульсов, произведенное с помощью анализатора спектра частот типа С4-25, позволило установить ее характерные значения — $1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^6$ Гц. Спустя некоторое время после появления высокочастотных пульсаций тока начинают появляться низкочастотные колебания с частотой питающей разряд сети, амплитуда которых может возрастать вплоть до перехода тлеющего разряда в дуговой (см. рис. 1, внизу, в). Этот процесс может быть вызван тем, что увеличение тока приводит к росту его плотности в точках повышенной проводимости на поверхности анода с их возможным нагревом вплоть до температуры плавления и испарения металла. Пары металла, появляющиеся в межэлектродном промежутке, понижают эффективный потенциал ионизации газовой среды, что может способствовать повышению проводимости этого промежутка с увеличением в нем тока. Объяснение этого явления дано в работе [5], где установлено,

что интенсивное испарение металла с поверхности катода способно привести к формированию в межэлектродном промежутке тлеющего разряда канала электрической дуги.

Исследование процесса электронно-лучевой обработки (ЭЛО) металлов [6] показало, что испарение металла с поверхности деталей под действием потока ускоренных электронов происходит непостоянно, а периодически, т. е. процесс состоит из последовательности элементарных циклов нагрев–вскипание–рассеяние (испарение), частота следования которых в условиях ЭЛО составляет $1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^6$ Гц.

Для того чтобы установить, вызваны ли возникающие высокочастотные колебания тока в тлеющем разряде испарением металла анода, необходимо определить вероятную температуру нагрева и характерное время энергонакопления, приводящее

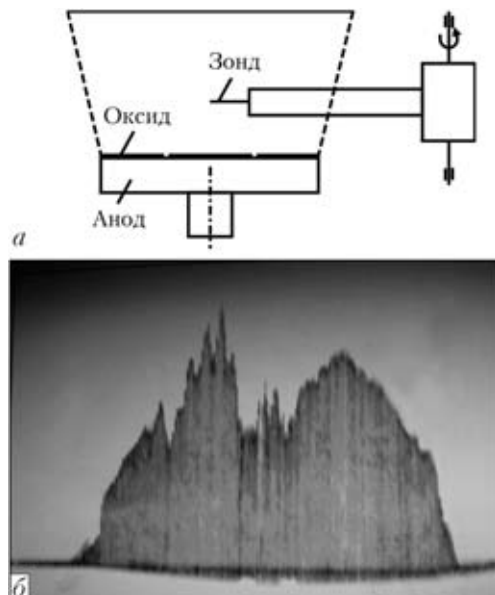


Рис. 2. Схема измерения плотности тока (а) и осциллограммы ее распределения (б) на поверхности анода тлеющего разряда



к перегреву и испарению металла с поверхности анода на участках повышенной плотности тока.

Полагая упрощенно образующуюся на поверхности анода электрическую дугу точечным источником теплоты на поверхности полубесконечного тела, предельную температуру в зоне нагрева можно определить, согласно [7], как

$$T = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda r}, \quad (1)$$

где T_0 — исходная температура анода (в условиях тлеющего разряда достигает 873...1073 К); q — мощность источника (дуги); λ — коэффициент теплопроводности материала анода; r — радиус пятна нагрева, ориентировочно определяемый по следам эрозии (оплавления) на поверхности анода.

Измерение поперечных следов дуги показало, что они составляют не более 0,001...0,002 м. С учетом этого для тока разряда 10 А и анодного падения потенциала 15 В (для азота, аргона и водорода его значение составляет 14...16 В), согласно (1) температура в пятне нагрева может достигать 3500...4000 К, что превышает температуру начала заметного испарения стального анода (примерно 3000 К).

Время энергонакопления зависит от плотности теплового потока и физических свойств металла. Поскольку бомбардировка анода в условиях тлеющего разряда осуществляется, как и при ЭЛО электронами, ускоренными в области анодного падения потенциала, то время цикла нагрев–испарение металла можно оценить с помощью зависимостей, используемых в теории ЭЛО [6, 8]. В этом случае время энергонакопления составляет

$$\tau = \frac{M^{2/3}(4\rho)^{-2/3}}{4a} \text{ [с]}, \quad (2)$$

где M — масса металла, охваченного вскипанием, г; ρ — плотность металла, г/см³; a — температуропроводность металла, см²/с.

Масса вещества, охваченного энерговыделением, связана с параметрами электронного потока (с использованием формулы Шенланда [9]), следующим соотношением [8]:

$$M = 1,65 \cdot 10^{-12} d^2 U^2 \text{ [г]}, \quad (3)$$

где d — характерный размер зоны испарения

(зоны действия дуги), см; U — потенциал ускорения электронов, В.

Для указанных ранее значений d и U , а также соответствующих теплофизических характеристик анода согласно зависимостям (2) и (3) характерное время энергонакопления составляет $\tau = 2 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-7}$ с, откуда возможная частота пульсаций процесса парообразования

$$f = 1 \cdot 10^7 \dots 0,5 \cdot 10^8 \text{ Гц,}$$

что весьма близко к частоте колебаний тока, наблюдаемой при экспериментах и, по-видимому, может служить подтверждением предложенной гипотезы.

Выводы

1. Во избежание появления очагов заметного испарения анода его целесообразно выполнять из тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама).

2. Поскольку образующиеся колебания тока разряда попадают в радиочастотный диапазон, то они могут быть легко обнаружены с помощью любого радиовещательного приемника со средневолновым диапазоном и служить сигналом для своевременного изменения режима.

3. Появляющаяся нестабильность разрядного тока связана не с наличием на поверхности анода диэлектрических пленок, а с неоднородностью их толщины и состава, что требует периодической замены или очистки анода.

1. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. — 386 с.
2. Гайсин Ф. М., Саттаров Р. К., Халиков Р. А. Исследование перехода тлеющего разряда в электрическую дугу при высоких температурах. — Казань: КАИ, 1975. — 12 с.
3. Голубев В. С. Тлеющий разряд повышенного давления. — М.: Наука, 1990. — 333 с.
4. Болотов Г. П., Сатюков А. И. Расчетная оценка границы устойчивости тлеющего разряда при диффузионной сварке // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 13–15.
5. Plesse H. The effect of temperature on the electrode a glow discharge at low pressure // Ann. d. Phys. — 1935. — № 22. — Р. 423.
6. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 238 с.
7. Рыкалин Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
8. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А. Новые методы сварки металлов и пластмасс. — М.: Машиностроение, 1966. — 278 с.
9. Назаренко О. К. Электронно-лучевая сварка. — М.: Машиностроение, 1981. — 146 с.

The influence of cathode processes on the glowing discharge stability is established. It is shown that under the conditions of heating by the high-current glowing discharge presence of non-uniform dielectric films on the anode surface because of its contamination during operation leads to formation of local sections with a higher current density on the anode, the presence of which promotes a transition of the glowing discharge into arc discharge.

Поступила в редакцию 17.06.2007