

Неровный В.М. ©

Профессор, д.т.н., кафедра «Технологии сварки и диагностики»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ПОЛОГО КАТОДА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ДУГОВОЙ ПАЙКИ В ВАКУУМЕ

Аннотация

Повысить ресурс работы полого катода рационально путем создания комбинированных катодов, внутренний слой которых состоит из вольфрамовой спирали с нанесенным активирующим веществом гексаборида лантана или оксидом иттрия, а внешний изготовлен из танталовой или молибденовой фольги.

Ключевые слова: дуговая пайка, вакуум, термоэмиссионный полый катод, тантал, оксид иттрия, гексаборид лантана.

Keywords: arc soldering, vacuum, thermionic hollow cathode, tantalum, yttrium oxide, lanthanum hexaboride.

В последнее время процесс дуговой пайки в вакууме находит все большее практическое применение. Как показал промышленный опыт, использование полого катода для дугового разряда в вакууме обеспечивает требуемый прогрев паяемых деталей из химически активных металлов, в частности, из литейных жаропрочных сплавов на никелевой основе [1]. Вместе с тем, резерв повышения качества и производительности этого процесса далеко не исчерпан и во многом зависит от ресурса работы прямоканального полого термоэмиссионного катода, как наиболее теплонагруженного элемента горелки.

Используемые при дуговой пайке в вакууме полые термоэмиссионные катоды, как правило изготавливают либо из танталовой фольги толщиной 0,05—0,1 мм путем сворачивания ее в цилиндрическую трубку диаметром 3,5—4 мм и длиной 30—45 мм (в несколько слоев) с толщиной стенки до 0,15—0,3 мм, либо из прутка тантала путем сверления до толщины стенки 0,8—1,5 мм. С технико-экономической и технологической точки зрения целесообразнее применять катоды из фольги, поскольку трудоемкость их изготовления значительно ниже, а коэффициент использования тантала близок к единице. Кроме того, тонкостенные полые катоды из фольги обеспечивают стабильный дуговой разряд на токах 6-100 А и выше при средней его плотности у выходного сечения 100-800 А/см² и длине дугового промежутка 20—60 мм, что делает его технологически гибким источником энергии для пайки в вакууме [1]. В этих условиях ресурс работы полого термоэмиссионного катода должен составлять 80-120 ч [2], а на практике составляет всего 8-30 ч, что явно неудовлетворительно.

Цель данной статьи - повышение ресурса работы прямоканальных термоэмиссионных катодов при дуговой пайке в вакууме.

На первом этапе исследовали механизм их разрушения. За критерий разрушения катода приняли появление на его стенке отверстия или сквозной трещины, приводящей к утечке плазмообразующего газа и вследствие этого к переходу дугового разряда в неустойчивое состояние.

Для сравнения катодов, выполненных из разных материалов, их ресурс работы оценивали весовым методом по удельной и пусковой эрозии. Температуру стенки полых катодов (тех же размеров, что и промышленные) измеряли с помощью оптических методов. Испытания проводили при давлении $(5-8) \cdot 10^{-2}$ Па в камере установки СДВ-11 и расходе плазмообразующего газа через катод (аргона высшего сорта) 0,5—1,5 мг/с.

Для полых прямоканальных катодов характерным является их неравномерный нагрев по длине (рис.1). Зону с максимальной температурой нагрева стенки катода принято называть «активной» [3]. Часть катода выше активной зоны условно назовем входной зоной, а ниже - выходной.

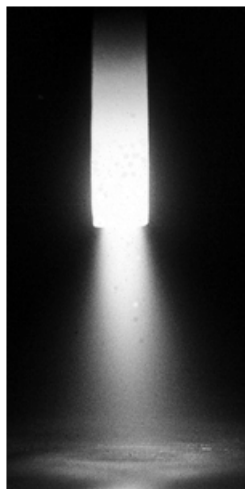


Рис. 1. Внешний вид дугового разряда с полым катодом

При анализе вышедших из строя танталовых катодов выявили три вида их разрушения: локальное расплавление стенки танталового катода с образованием сквозного отверстия (рис.2а); прожог стенки, характеризующийся наличием темно-серого налета; значительное искривление катода относительно его продольной оси, сопровождающееся возникновением сквозных трещин и прожогов (рис.2б). Все разрушения, как правило, происходят во входной зоне катода, где стенка во время работы нагревается до 1500-1800 °С.

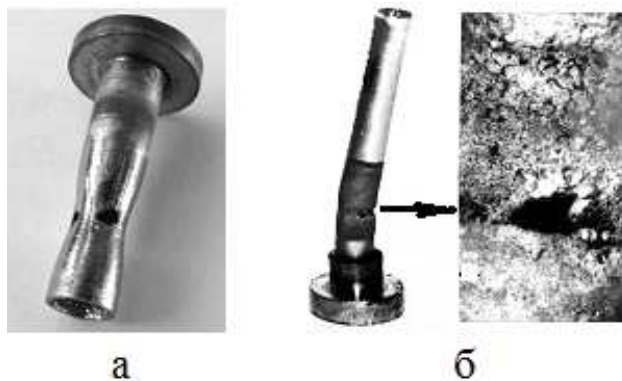


Рис. 2. Виды разрушения полого термоэмиссионного катода

Металлографические исследования мест разрушения катода во всех случаях показали наличие структур, содержащих оксиды: TaO_2 и Ta_2O_5 . Это свидетельствует о том что металл нагретой стенки катода взаимодействует с кислородом, содержащимся в плазмообразующем газе (давление которого во входной зоне не превышает 800-1100 Па [4], имеющим парциальное давление $(6-7)10^{-3}$ Па. Это значительно выше минимального порогового значения начала взаимодействия тантала с кислородом (10^{-5} Па) [5]. По мере насыщения тантала кислородом происходит образование эвтектического сплава ($Ta-Ta_2O_5$). Это и является главной причиной локального расплавления стенки катода, поскольку температура плавления этого сплава составляет как раз 1500-1800 °С. Появление сквозных трещин и прожогов во входной зоне стенки катода связано не только с процессами окисления, но и с возникновением интенсивной локальной эрозии и термических напряжений, обусловленных «привязкой» холодных катодных пятен в этой зоне на начальном этапе процесса возбуждения дугового разряда в вакууме.

Таким образом, повысить ресурс работы танталовых полых катодов можно, либо существенно уменьшив содержание кислорода в аргоне, либо защитив внутреннюю полость катода от взаимодействия с ним. Использование спектрально-чистого аргона позволило в 2-3 раза увеличить ресурс работы катода. Однако из-за его дефицитности реализация этого способа остается проблематичной.

Более приемлемой является дополнительная очистка аргона высшего сорта в процессе его подачи в горелку. При использовании очистителя газа, главным элементом которого является реактор с титановой стружкой, нагретой до 750-800 °С, получили ресурс катода такой же, как и при работе со спектрально-чистым аргонem. В результате применения очищенного аргона удалось повысить стабильность возбуждения дугового разряда и практически избавиться от появления «холодных» катодных пятен. В этих условиях ресурс полого катода определяется в основном механизмом термического испарения тантала и окислением внешней стенки катода. Об этом свидетельствует ее утонение в активной зоне. Следовательно, резерв дальнейшего повышения ресурса таких катодов исчерпан, поскольку скорость испарения тантала при температуре 2200-2800 °С и давлении в камере $(5-8) \cdot 10^{-2}$ Па довольно высока и составляет $(3-8) \cdot 10^{-5}$ кг/(м²·с) [5].

Установка сменных танталовых втулок внутри входной зоны катода в качестве защитного экрана (с целью предупреждения окисления стенки) позволила несколько увеличить срок его эксплуатации. Однако нижняя часть сменной втулки часто подплавляется, что затрудняет ее удаление. Поэтому данный способ не дает особых преимуществ.

Заметно повысить ресурс работы полого термоэмиссионного катода можно только путем использования нового материала с относительно низкой работой выхода электронов, высокой плотностью эмиссионного тока (при значительном диапазоне давлений), эрозионной стойкостью против ионной бомбардировки, а также обладающего химической инертностью, восстанавливаемостью эмиссии после «отравления» и низкой скоростью термического испарения при рабочей температуре [6].

Большинству этих требований удовлетворяют катоды импрегнированного типа, полученные пропиткой вольфрамовой пористой матрицы алюминатом или алюмосиликатом Ва-Са. Технологичность их изготовления достаточно высока, поскольку матрицей этих катодов служит пористый вольфрам, который можно получить из спеченного псевдосплава вольфрам-медь марки ВМ (зарубежный аналог типа эльконайт). Хорошая обрабатываемость точением и фрезерованием этих псевдосплавов позволяет получать катоды практически любой конфигурации. После механической обработки медь из заготовки катода сначала вытравливают в концентрированной азотной кислоте в течение 24-30 ч и далее ее оставшуюся часть выпаривают нагревом катода в вакуумной камере до 2000-2250 К с выдержкой 3-5 мин. Процесс выпаривания можно успешно проводить с помощью дугового разряда с полым катодом в вакууме.

Результаты исследования показали высокую стабильность возбуждения дугового разряда при довольно низкой удельной эрозии $(2-7) \cdot 10^{-12}$ кг/Кл, что почти на два порядка меньше, чем для катодов из чистого тантала. Однако из-за неравномерного нагрева катода по длине и высокой скорости испарения активирующей присадки в активной зоне, где температура достигает 1600-1800 °С, стабильность эмиссионных характеристик через 12-15 ч непрерывной работы резко падает при одновременном интенсивном повышении температуры катода, что требует повторной пропитки матрицы.

Существенным недостатком импрегнированных катодов является также и низкое значение вольтова эквивалента (отношения эффективной мощности дугового разряда к его току), которое почти вдвое меньше, чем при работе с танталовыми катодами. Поэтому для получения одинаковой эффективной мощности дугового разряда с использованием импрегнированных катодов необходимо почти в 2 раза увеличить ток разряда, что не всегда рационально. Так, для обеспечения его теплового воздействия мощностью 1400-1500 Вт на изделие ток разряда нужно повысить до 60-70 А. Однако в этих условиях разряд переходит

из диффузной формы в контрагированную [1], характеризующуюся значительно большей плотностью теплового потока в пятне нагрева, чем необходимо для пайки. Таким образом, верхний предел эффективной мощности разряда с данными катодами ограничен величиной 950-1000 Вт и применение разряда для пайки с большей мощностью требует использования магнитных систем для сканирования его внешнего столба.

Наилучшие результаты были получены при использовании полых термоэмиссионных катодов, изготовленных из вольфрама, легированного такими активирующими присадками, как оксид лантана или иттрия. Катоды из иттрированного вольфрама ЭВИ-2 (ГОСТ 23949—80) при дуговой пайке имели ресурс работы порядка 100-120 ч. Однако технологичность их изготовления очень низкая, поскольку вольфрамовые сплавы относятся к классу труднообрабатываемых и требуют использования электрофизических методов или алмазного инструмента. Это существенно сдерживает применение полых катодов из легированного вольфрама.

По эксплуатационным и технологическим показателям наиболее целесообразно создание комбинированных полых катодов, внутренний слой которых выполнен из материала с малыми работой выхода и скоростью испарения при рабочей температуре, а внешний слой — из тугоплавкого металла. К тому же внутренний слой должен быть более стоек к «отравлению» примесями аргона, чем внешний. Наилучшим образом этим требованиям отвечают Y_2O_3 , LaB_6 , La_2O_3 и ZrO_2 [7]. Однако нанесение этих материалов на тантал представляет определенную трудность, к тому же покрытие имеет недостаточное сцепление с подложкой.

В производственных условиях более технологичным представляется способ изготовления тонкостенного полого катода из танталовой или молибденовой фольги. При этом, во внутреннюю полость катода вставляют плотно навитую спираль из вольфрамовой проволоки диаметром 0,3-0,5 мм. (рис. 3) Затем на спираль наносят смесь, состоящую из эмиссионного вещества и биндера, в качестве которого с успехом может быть использован 10%-ный раствор акриловой смолы БМК-5 в растворителе Р5. После непродолжительной просушки на воздухе подготовленный таким образом катод прогревают в вакууме проходящим током порядка 80-100 А в течение 1-2 мин. В данном случае вольфрамовая спираль служит армирующим каркасом, а также обеспечивает увеличение (в 2-3 раза) площади контактирования с эмиссионным веществом, что в конечном счете позволяет получить несравненно большую прочность его сцепления с подложкой.

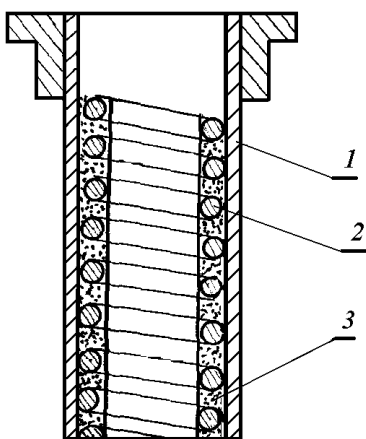


Рис. 3. Комбинированный полый катод: 1 – танталовая фольга, 2 – вольфрамовая спираль, 3 – эмиссионное вещество

При работе такого катода в рабочем режиме температура в его активной зоне не превышает 2000-2200 °С. При этом, качественное нанесение внутреннего слоя катода обеспечивает эффективную защиту фольги от окисления кислородом, содержащимся в аргоне. В результате удельная эрозия комбинированных катодов значительно меньше по

сравнению с танталовыми, особенно при нанесении эмиссионного вещества Y_2O_3 или LaB_6 . Однако по стабильности эмиссионных характеристик комбинированные катоды с гексаборидом лантана несколько ниже, чем с оксидом иттрия главным образом из-за отслаивания в результате образования борида металла подложки.

Испытания комбинированных катодов с оксидом иттрия показали, что повторное нанесение эмиссионного вещества требуется только после 20-30 ч непрерывной работы. При этом допускается многократное восстановление, а ресурс работы в основном ограничивается скоростью окисления внешней поверхности стенки катода (определяемой давлением и составом среды в вакуумной камере) и фактически равен ресурсу работы катодов из иттрированного вольфрама. Вместе с тем технология изготовления таких катодов и вольт эквивалент дугового разряда на аноде практически такие же, что и для танталовых катодов.

Выводы

1. Основной причиной малого ресурса работы танталовых полых термоэмиссионных катодов при дуговой пайке в вакууме является интенсивное окисление нагретой до 1500—1800 °С входной зоны катода кислородом, содержащимся в плазмообразующем газе (аргоне).

2. Увеличить ресурс работы полого катода удастся с помощью дополнительной очистки аргона или использования спектрально-чистого аргона, а также путем создания комбинированных катодов, внутренний слой которых состоит из вольфрамовой спирали с нанесенным оксидом иттрия, а внешний изготовлен из танталовой, или молибденовой фольги.

Литература

1. Неровный В.М., Ямпольский В.М. Сварочные дуговые процессы в вакууме. - М.: Машиностроение. 2002. 264 с.
2. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. /М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров и др. Новосибирск - Наука, 1982. 157 с.
3. Lidsky L. M. Highly ionized hollow cathode discharge//Journal of Applied Physics, 1962. V. 33. N 8. P. 2490-2497.
4. Неровный В.М., Подъяпольский Г. В., Ямпольский В.М. Параметры плазмы во внутренней полости неплавящегося катода сварочного дугового разряда. /Автоматическая сварка. 1985. № 12. С. 20-23.
5. Тугоплавкие металлы и сплавы. /Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов, К. Б. Поварова и др. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
6. Высокоэффективный эмиттер электронов на основе гексаборида лантана. /В. С. Кресанов, Н. П. Малахов, В. В. Морозов и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 152с.
7. Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В. Термоэмиссионные дуговые катоды. - М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.