

МЕТОДЫ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЙ В ВАКУУМЕ С ПОМОЩЬЮ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА

В. А. Столбовой

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 13.05.2016

Рассмотрены варианты модернизации вакуумно-дуговой установки типа «БУЛАТ-6» для нагрева и пайки деталей в вакууме. Показаны методики пайки на серебряные припои при нагреве изделий ионами металлов. Использование Cu в качестве материала припоя возможно только при модернизации установки и использовании двухступенчатого разряда. Это позволило припаивать Cr, Mo, Zr, W, Ti и другие тугоплавкие материалы друг с другом без использования флюсов.

Ключевые слова: вакуумно-дуговые установки, двухступенчатый разряд, катоды, тугоплавкие материалы.

МЕТОДИ ПАЯННЯ ВИРОБІВ У ВАКУУМІ ЗА ДОПОМОГОЮ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РОЗРЯДУ

В. О. Столбовий

Розглянуто варіанти модернізації вакуумно-дугової установки типу «БУЛАТ-6» для нагрівання та паяння деталей у вакуумі. Наведені методики паяння на срібні припої при нагріванні виробів іонами металів. Використання Cu як матеріалу припою можливе лише за умови модернізації установки і використання двоступеневого розряду. Це дало можливість припаювати Cr, Mo, Zr, W, Ti та інші тугоплавкі матеріали один з одним без використання флюсів.

Ключові слова: вакуумно-дугові установки, двоступеневий розряд, катоди, тугоплавкі матеріали.

SOLDERING PRODUCTS IN VACUUM USING VACUUM ARC DISCHARGE

V. A. Stolbovoy

The variants of modernization of vacuum-arc installation type «Bulat-6» for heating and soldering parts in a vacuum were considered. Techniques for silver brazing filler metals during heating product with metal ions were listed. Using Cu as the solder material is possible only at modernizing installation and using a two-stage discharge. This allowed to solder Cr, Mo, Zr, W, Ti and other refractory materials with each other without using of flux.

Keywords: vacuum-arc installation, two-stage discharge, cathodes, refractory materials.

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумно-дуговой метод широко применяется для нанесения покрытий, обладающих высокими физико-механическими характеристиками [1]. Обычно вакуумно-дуговые установки чаще всего применяются для нанесения износостойких покрытий из нитридов тугоплавких металлов для увеличения срока службы режущих инструментов и деталей машин [1]. Широко применяются вакуумно-дуговые технологии для нанесения защитно-декоративных покрытий.

Плазма, генерируемая вакуумно-дуговым разрядом, кроме нанесения покрытий может

также использоваться для пайки небольших металлических частей [2].

Вакуумная пайка титановых деталей, применяемая в аэрокосмической, автомобильной и другой технике, является дорогим и энергозатратным процессом [3]. В то время как пайка титана широко используется в промышленности, пайка хрома применяется редко из-за его высокой активности и образования стабильных поверхностных оксидов, образование которых начинается уже при температуре 538 °С даже при давлении 10^{-4} Торр (0,013 Па) [4]. Поэтому пайка хромовых деталей требует более

высокого вакуума и малой продолжительности процесса при наиболее возможно низкой температуре.

Наиболее широко применяемыми покрытиями в вакуумно-дуговом методе упрочнения поверхности являются нитриды тугоплавких материалов. Изготовление катодов из многокомпонентных порошковых или литых сплавов, а также тугоплавких (хрома, молибдена, вольфрама, циркония, титана) материалов иногда вызывает сложность или в принципе невозможно. Поэтому при изготовлении катодов из таких материалов применяют вакуумную пайку.

В машиностроении существуют установки, позволяющие производить вакуумную пайку деталей [3, 4]. Это оборудование является весьма дорогостоящим и для большинства участков по нанесению вакуумно-дуговых покрытий, которые располагаются на инструментальных и машиностроительных заводах, его использование нерентабельно.

Поэтому модернизация вакуумно-дугового оборудования для пайки испаряемых материалов (катодов) является актуальной задачей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Известно, что испаряемые материалы (катоды) требуют интенсивного водяного охлаждения, поэтому для их вакуумного уплотнения применяются резьбовые или байонетные элементы. Наиболее дешевым и универсальным материалом для нанесения износостойких покрытий является титан, который допускает нарезание резьбы для узла вакуумного уплотнения, однако при этом безвозвратные потери катода составляют около 15 мм при общей длине катода порядка 50–70 мм. Другие испаряемые материалы, например как хром, вольфрам значительно дороже или из-за высокой хрупкости или твердости вообще не допускают нарезания резьбы или изготовления байонетного соединения. Кроме того, испаряемый материал может быть пористым (например, графит) или иметь сквозные трещины, сквозь которые может происходить протекание охлаждающей жидкости. На рис. 1 в качестве примера показан катод с трещинами с припаянной резьбовой частью.



Рис. 1. Фотография паяного Сг катода с трещинами

В связи с чем необходимо чтобы катодная система состояла из двух частей: резьбовой и испаряемой, которые можно соединить с помощью припоя. При изготовлении катода на большем торце его основной испаряемой части делается выточка глубиной 1,5–2 мм (рис. 2). Резьбовую часть катода изготавливают из меди, если при пайке используется медно-серебряный припой, например марки ПСР45. Однако на практике чаще всего используют ранее отработанный катод из титана, из которого вытачивают резьбовую часть по диаметру выточки в основной части катода (рис. 2). В последнем случае в качестве припоя используется медная фольга 0,2–0,4 мм.



a



б

Рис. 2. Катод из молибдена (*a*), катод из графита (*б*) резьбовая часть из титана и медная фольга в качестве материала припоя

Предварительно припаиваемые поверхности катода и фольга тщательно полируются, затем промываются в щелочной среде в ультразвуковой ванне с последующей промывкой в чистой воде. Окончательная промывка осуществляется нефрасом марки С20/80.

Медная фольга располагается в углублении на основной части катода, сверху устанавливаются резьбовую часть. Для улучшения качества пайки на спаиваемые детали устанавливается грузик обычно из стали, что обеспечивает прижатие деталей.

Для обеспечения более высокого качества пайки медно-серебряным припоем, для их лучшей смачиваемости припоем поверхности основной и резьбовой частей катода предварительно покрывают слоем меди толщиной 2–3 мкм вакуумно-дуговым методом в этой же установке.

На рис. 3. показаны припаянные медно-серебряным припоем многокомпонентные катоды и подготовленная к пайке резьбовая часть катода, изготовленная из титана и покрытая слоем из меди.



Рис. 3. Многокомпонентные катоды, паянные медно-серебряным припоем

Пайка элементов катода осуществлялась в вакуумно-дуговой установке «БУЛАТ-6». Предварительная откачка камеры осуществлялась до $(3-5) \cdot 10^{-5}$ Торр ($(4-6) \cdot 10^{-3}$ Па).

МЕТОДЫ ПАЙКИ

Существует три схемы включения установки при пайке элементов катода в вакуумно-дуговой установке типа «БУЛАТ-6»: пайка при прямом плазменном потоке, пайка в двухступенчатом разряде при отрицательном

потенциале, пайка в двухступенчатом разряде при положительном потенциале.

Пайка элементов катода при прямом плазменном потоке

Предлагаемая схема, позволяет без каких либо изменений в вакуумно-дуговой установке производить пайку.

Благодаря процессам взаимодействия ионов с поверхностью детали происходит нагрев подложки вследствие высокой степени ионизации плазмы и высокого отрицательного потенциала, приложенного к детали. Энергия ионов является основным фактором, влияющим на скорость (интенсивность) нагрева.

Энергия ионов, бомбардирующих нагреваемую деталь, состоит из их начальной энергии и энергии, приобретённой на длине дебаевского радиуса у поверхности детали при приложении к ней отрицательного потенциала [1].

$$E_i = E_0 + eZU_n, \quad (1)$$

где E_i — энергия иона; E_0 — начальная энергия; Z — кратность заряда иона; U_n — потенциал детали.

На рис. 4. представлена схема вакуумно-дуговой установки «БУЛАТ-6» используемая для пайки деталей на прямом плазменном потоке. Она включает в себя: вакуумную камеру 1; три источника питания испарителей 2; три катодных узла 3; источник высоковольтного напряжения 4; припаиваемые детали 5; подложкодержатель (поворотное устройство) 6.

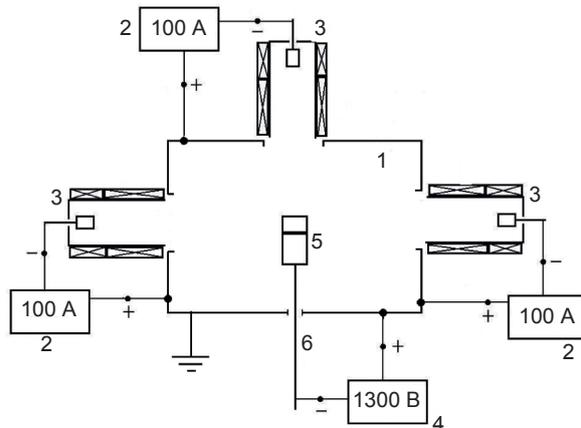


Рис. 4. Схема вакуумно-дуговой установки для пайки деталей на прямом пучке: 1 — вакуумная камера; 2 — источники питания испарителей; 3 — катодные узлы; 4 — источник высоковольтного напряжения; 5 — припаиваемые детали; 6 — подложкодержатель (поворотное устройство)

При включении испарителя возникают потоки металлической плазмы, направленные в сторону детали, расположенной в центре вакуумной камеры на вращающемся подложкодержателе. Испаряемый материал титан, осаждающийся на стенках камеры, способствует улучшению вакуумных условий. При подаче на детали отрицательного потенциала 110–1300 В, происходит интенсивный их нагрев. [1, 2]. При этом скорость нагрева и максимальная температура зависит от количества источников дуги и их расстояния до спаиваемых деталей. При включении трех источников дуги при 100 А в каждом интенсивность разогрева деталей увеличивается [2]. Время до расплава ПСР-45 достигает 20–30 минут в зависимости от массы припаиваемых деталей.

Пайка в двухступенчатом разряде при отрицательном потенциале

Двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд (ДВДР) представляет собой разряд, в котором положительный столб дуги разделён на две ступени, первая из которых представляет собой вакуумную дугу с холодным катодом, а вторая ступень — положительный столб дугового разряда в плазме рабочего газа низкого давления [1]. Нагреваемое изделие находится в области газовой плазмы.

На рис. 5 показана схема модернизации установки для формирования ДВДР. На выходе испарителя 3 установлен экран в виде системы дисков (или жалюзи) 8, пропускающие частицы рабочего газа (азота или аргона) и электроны, и задерживающие испаренные частицы катода. Испаренные с поверхности катода 3 частицы металла не могут проникнуть в рабочий объем вакуумной камеры 1, а осаждаются на поверхности объема 8. При этом корпус противоположно расположенного испарителя 7 электрически изолирован от корпуса камеры и к нему подключен положительный полюс блока питания дуги 2. На детали 5 от высоковольтного источника 4 подается отрицательный потенциал около 1300 В.

При достижении давления $(2-3) \times 10^{-5}$ мм рт. ст. в вакуумную камеру 1 напускают азот (или аргон) до давления около $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., включают дуговые

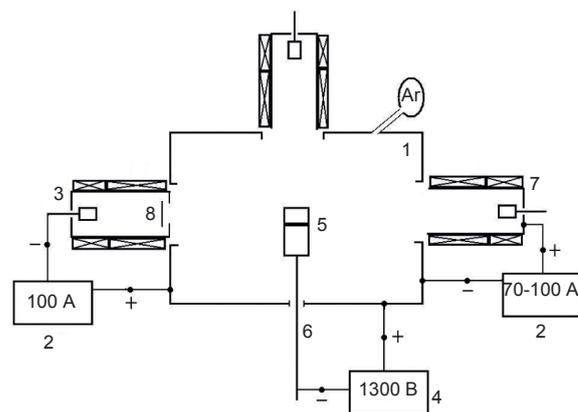


Рис. 5. Схема вакуумно-дуговой установки для пайки деталей с помощью двухступенчатого разряда: 1 — вакуумная камера (область с газовой плазмой); 2 — источники питания испарителей; 3 — катодный узел; 4 — источник высоковольтного напряжения; 5 — припаиваемые детали; 6 — подложкодержатель (поворотное устройство); 7 — катодный узел используемый в качестве анода (для плазмы); 8 — экран (жалюзи)

источники 2, и высоковольтный источник 4. Для равномерной прогреваемости включается поворотное устройство 6 и осуществляется вращение деталей 5.

В объеме вакуумной камеры 1 возникает газовый дуговой разряд, ионы рабочего газа бомбардируют и нагревают припаиваемые детали.

Время нагрева до расплава также зависит от массы и объема припаиваемых деталей. Время расплава припоя ПСР-45 составляет 20–25 мин. рис. 6.

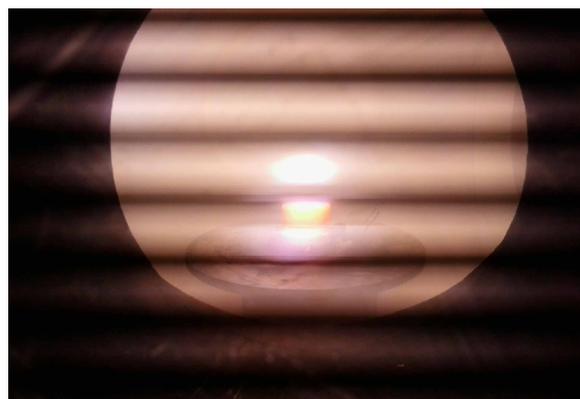


Рис. 6. Фотография спаиваемых деталей в момент расплава припоя в плазме двухступенчатого разряда

Пайка в двухступенчатом разряде при положительном потенциале

На рис. 7 показана схема формирования ДВДР, при которой подложкодержатель используется в качестве анода. Как и в предыдущей схеме на выходе испарителя 2

установлен экран в виде системы дисков (или жалюзи), пропускающие частицы рабочего газа (азота или аргона) и электроны, и задерживающие испаренные частицы катода.

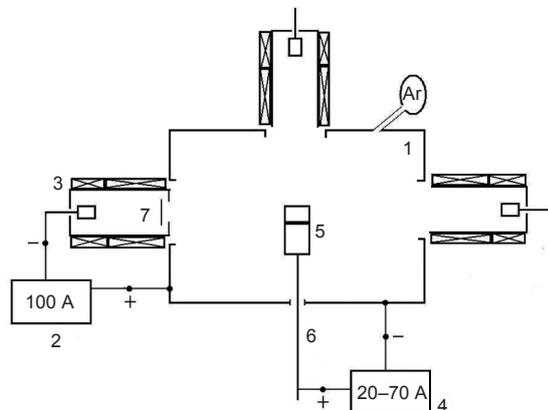


Рис. 7. Схема вакуумно-дуговой установки для пайки деталей с помощью двухступенчатого разряда при положительном потенциале: 1 — вакуумная камера (область с газовой плазмой); 2 — источник питания испарителя; 3 — катодный узел; 4 — дуговой источник питания; 5 — припаяваемые детали; 6 — подложкодержатель (поворотное устройство); 7 — экран (жалюзи)

Блок питания дуги 4 подключен положительным полюсом к поворотному устройству 6 с деталями 5 и при включении катода 3 и подаче в камеру газа (азота, аргона) до давления $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. в камере 1 возникает газовый дуговой разряд, анодом которого являются нагреваемые детали.

При использовании подложкодержателя в качестве анода ток может достигать 100 А (зависит от размера), оптимальный порядка 50 А. Таким образом происходит очень быстрый разогрев деталей рис. 8. Полный расплав медной фольги происходит за время 6–15 мин. Расплав припоя на основе ПСР-45

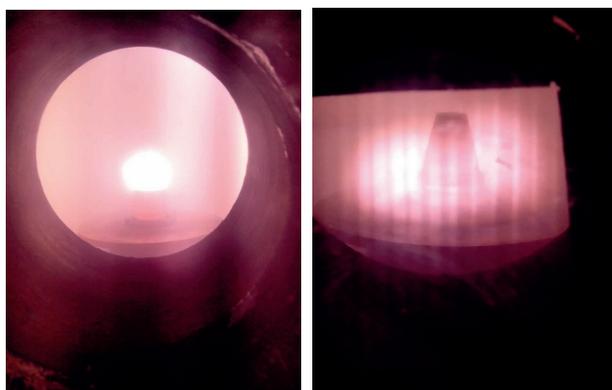


Рис. 8. Нагрев и пайка деталей в двухступенчатом разряде при положительном потенциале

происходит за время 3–8 мин. Разброс по времени нагрева до расплава припоя связан с массой и объемом спаиваемых деталей.

Вакуумно-дуговая пайка медным припоем позволяет уменьшить количество операций со спаиваемыми деталями по сравнению с медно-серебрянными припоями. На рис. 9 показаны катоды, припаянные медным припоем.



Рис. 9. Фотография молибденового (а) и графитового (б) катода, спаянного с титановой резьбовой частью медным припоем

ВЫВОДЫ

1. Предложены три схемы модернизации вакуумно-дуговой установки типа «БУЛАТ-б» для нагрева и пайки изделий в вакууме, позволяющей решить проблему обеспечения вакуумного уплотнения катодов резьбовым соединением.

2. Рассмотрена методика пайки в вакууме на высокотемпературный припой типа ПСР-45, с использованием металлической плазмы дуговых источников. Время нагрева до температуры плавления составляет 20–30 мин.

3. Модернизация вакуумно-дуговой установки для двухступенчатого разряда позволяет увеличить скорость нагрева деталей до температуры 720 °С за 8 минут.

4. Разработана методика пайки в вакуумно-дуговой установке, позволяющая использовать в качестве припоя медную фольгу, что позволяет улучшить и удешевить процесс пайки.

5. Использование двухступенчатого вакуумно-дугового разряда для нагрева деталей в вакууме является одним из энергетически обоснованных методов, и не вносит примеси в нагреваемые детали т. е. этот метод является конкурентоспособным по сравнению с промышленными установками для вакуумной пайки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А. А., Саблев Л. П., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые покрытия. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. — 317 с.
2. Markovich M., Fischer G., Shapiro A. E. Brazing Titanium and Chromium Using Ion Bombardment Heating // *Welding journal*. — 2011. — P. 41–43.
3. Elrefaey A., Wojarski L., Pfeiffer J., Tilmann W. Preliminary Investigation on Ultrasonic-Assisted Brazing of Titanium and Titanium / Stainless Steel Joints // *Welding journal*. — 2013. — P. 148–153.
4. Кантер А. Вакуумная пайка залог качественного паяного соединения. Технологии в электронной промышленности. — 2013. — № 6. — С. 30–33.
5. Суслов А. А. Пайка слоистых конструкций на основе алюминия и титана // *Сварочное производство*. — 1994. — № 12(721). — С. 11–13.
6. Беляков В. И. Диффузионная сварка изделий с принудительным деформированием в вакуумных печах // *Изв. вузов. Машиностроение*. — 1993. — № 3–5. — С. 92–96.

7. Гладков Э. А. Разработка новых процессов и методов их управления и автоматизации применительно к существующим и новым конструкционным материалам // *Машиностроение*. — 1993. — № 6. — С. 12–14.

LITERATURA

1. Andreev A. A., Sablev L. P., Grigor'ev S. N. Vakuumno-dugovye pokrytiya. — Har'kov: NNC HFTI, 2010. — 317 p.
2. Markovich M., Fischer G., Shapiro A. E. Brazing Titanium and Chromium Using Ion Bombardment Heating // *Welding journal*. — 2011. — P. 41–43.
3. Elrefaey A., Wojarski L., Pfeiffer J., Tilmann W. Preliminary Investigation on Ultrasonic-Assisted Brazing of Titanium and Titanium / Stainless Steel Joints // *Welding journal*. — 2013. — P. 148–153.
4. Kanter A. Vakuumnaya pajka zalog kachestvennogo payanogo soedineniya. Tehnologii v elektronnoj promyshlennosti. — 2013. — No. 6. — P. 30–33.
5. Suslov A. A. Pajka sloistyh konstrukcij na osnove alyuminiya i titana // *Svarochnoe proizvodstvo*. — 1994. — No. 12(721). — P. 11–13.
6. Belyakov V. I. Diffuzionnaya svarka izdelij sprinuditel'nyh deformirovaniem v vakuumnyh pechah // *Izv. vuzov. Mashinostroenie*. — 1993. — No. 3–5. — P. 92–96.
7. Gladkov E. A. Razrabotka novyh processov i metodov ih upravleniya i avtomatizacii primenitel'no k suschestvuyuschim i novym konstrukcionnym materialam // *Mashinostroenie*. — 1993. — No. 6. — P. 12–14.