

## ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД КАК ИСТОЧНИК НАГРЕВА В ПРОЦЕССАХ СВАРКИ И ПАЙКИ (ОБЗОР)

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

Приведены основные результаты исследований и разработок, направленных на совершенствование и расширение технологических возможностей тлеющего разряда как источника нагрева для сварочных процессов. Показаны перспективные способы повышения устойчивости разряда, охарактеризованы основные типы источников питания и оборудования. Указан круг технологических задач, успешно решаемых способами сварки и пайки в тлеющем разряде.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, пайка, тлеющий разряд, устойчивость, источники питания, оборудование, область применения

Специфическое сочетание физико-химических и технологических особенностей образования диффузионных сварных соединений затрудняет применение концентрированных сварочных источников энергии, предъявляет повышенные требования к локальности и регулированию интенсивности нагрева поверхностными распределенными источниками теплоты, их приспособляемости к нагреву деталей разнообразной формы и габаритов. Из используемых в настоящее время для диффузионной сварки источников энергии (индукционный, радиационный, электроконтактный и др.) наиболее полно указанным требованиям отвечает тлеющий разряд, горящий в инертных или восстановительных газах при давлении ниже атмосферного.

Попытки применения тлеющего разряда в качестве источника нагрева для диффузионной сварки и пайки металлов относятся к началу 60-х годов [1]. В этот же период были проведены эксперименты по пайке металлов [2] и зонной рафинирующей плавке кремния [3] тлеющим разрядом в водороде. Уже в первых работах [4, 5] отмечались простота оборудования, высокая эффективность и экономичность применяемого процесса. Однако вместе с благоприятными предпосылками были обнаружены и различные виды нестабильности газоразрядной плазмы, а также зависимость технологических параметров от формы и материала изделий, что потребовало изучения физико-технических особенностей плазмы тлеющего разряда как сварочного источника энергии.

В опубликованном в 1978 г. обзоре [6] и монографии [7] обобщены результаты исследований и опыт промышленного применения тлеющего разряда при сварке разнородных металлов, сплавов и неметаллических материалов; рассмотрены процессы в газоразрядной плазме средних давлений; приведены характеристики разработанного оборудования; показана перспективность применения тлеющего разряда как сварочного источника нагрева. В последующем основное внимание было уделено исследованиям энергетических характеристик тлею-

щего разряда в условиях сварки и пайки, дальнейшему изучению и расширению его технологических возможностей, в частности, за счет повышения стабильности горения разряда при изменяющихся в широких пределах режимах нагрева, а также разработке новых экономичных источников питания и созданию высокопроизводительного автоматизированного оборудования.

Сварка и пайка в нормальном тлеющем разряде производится при давлении газа 1,33... 13,3 кПа и межэлектродных расстояниях  $(5... 15) \cdot 10^{-3}$  м. При таких давлениях температура газа в положительном столбе разряда достигает 1500... 3500 К [8, 9], а протяженность зоны катодного падения потенциала, отделяющего положительный столб от катода (изделия), снижается до долей миллиметра [10]. В этих условиях до 80 % выделяющейся в столбе разряда электрической энергии передается посредством теплопроводности газа катоду, являющемуся активным тепловым стоком, и, наряду с действием ускоренных ионов, обеспечивает его эффективный нагрев. Благодаря суммарному действию на катод двух источников теплоты КПД нагрева достигает 0,70... 0,95 и в значительной степени зависит от давления газа (рис. 1) [11].

Специфическим свойством тлеющего разряда как поверхностного источника нагрева, существенно повышающим его технологичность, является возможность изменения в широких пределах плотности потока тепловой энергии на поверхности соединяе-

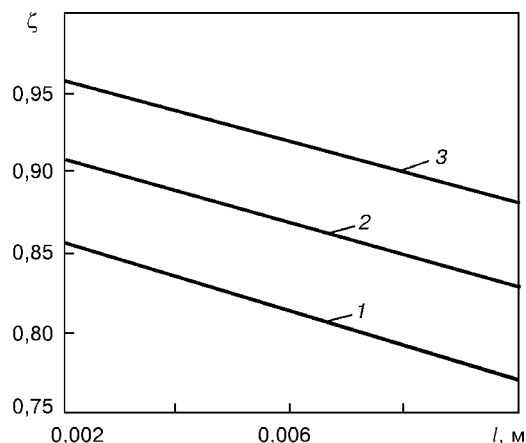


Рис. 1. Зависимость КПД нагрева тлеющим разрядом в азоте от межэлектродного расстояния  $l$  при давлении газа  $p = 2,67$  (1); 8,0 (2) и 13,3 (3) кПа

**Болотов Геннадий Павлович** — выпускник ЧФ КПИ 1973 г., доцент кафедры сварочного производства.

© Г. П. Болотов, 2001

мых деталей. Изменение давления газа  $p$  в рабочей камере приводит к изменению плотности тока  $j$  в зоне нагрева в приблизительном соотношении  $j \sim p^2$  [10]. Это позволяет варьированием давления газа в сравнительно небольших пределах изменять плотность тока в диапазоне от  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  до  $0,1 \dots 0,5 \text{ А/см}^2$  [6], что соответствует изменению коэффициента сосредоточенности от 0,01 до 0,50 (рис. 2). Появляется возможность производить в тлеющем разряде как равномерный плавный нагрев тонкостенных изделий [12], так и локальный достаточно интенсивный нагрев крупногабаритных заготовок [13].

Тлеющий разряд является промежуточной формой газового разряда и при определенных условиях способен переходить в его более устойчивую форму — электрическую дугу, приводящую к недопустимому перегреву и оплавлению детали. Формирование дугового разряда может вызвать эмиссионную пятнистость поверхности деталей, обусловленная наличием на ней окалины, жировых загрязнений, щелей и зазоров критического размера [6], которые способствуют локальному повышению плотности тока на катоде.

Качественная подготовка поверхности деталей перед сваркой, применение защитных газовых сред с пониженным содержанием кислорода, совершенствование конструкции узла позволяют существенно снизить вероятность образования дуги.

В условиях сварки и пайки проволоочный или ленточный стальной анод выполняется в виде контура, соответствующего форме нагреваемого сечения. В этом случае плотность тока в разряде оказывается существенно неравномерной — на аноде и прианодной области она почти на порядок превышает плотность тока на катоде. В процессе работы на поверхности анода или отдельных его участках осаждаются загрязнения в виде оксидных пленок, полимеризовавшихся в разряде паров вакуумного масла и др., имеющих низкую электропроводность. Эффективная поверхность анода, через которую замыкается ток разряда, снижается, что повышает плотность тока в прианодной плазме [14]. Увеличение плотности тока на аноде до критической ( $1,5 \dots 2,0 \text{ А/см}^2$ ) и более способствует дальнейшему самопроизвольному сжатию плазмы появляю-

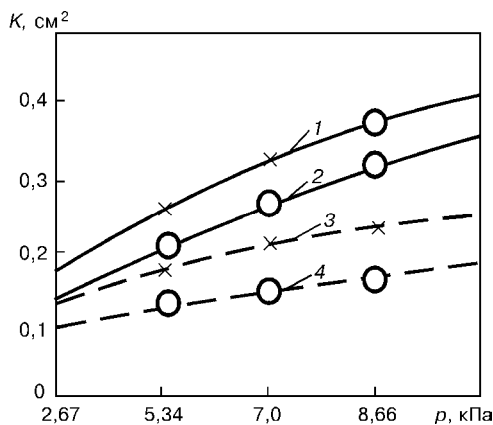


Рис. 2. Зависимость коэффициента сосредоточенности тлеющего разряда от давления газа в аргоне (1, 2) и гелии (3, 4) при  $I = 2$  (2, 4) и 5 (1, 3) А

щимся собственным магнитным полем [7, 10] с развитием в ней канала дугового разряда. Устранение этого негативного фактора производится периодической очисткой или заменой анода.

Переход сильноточного тлеющего разряда в дуговой сопровождается значительными ударными токовыми перегрузками источника питания и соединяемых деталей. Для снижения таких перегрузок в цепь разряда включают сглаживающие фильтры или устанавливают специальные дугогасящие устройства, реагирующие на изменение тока или напряжения в разрядной цепи и воздействующие на них таким образом, чтобы привести их к значениям, соответствующим области существования тлеющего разряда. Применяемые устройства можно разделить на три группы: поддерживающие ток разряда на неизменном уровне [7]; кратковременно отключающие напряжение питания [15]; снижающие ток разряда на некоторое значение [16]. Формирование дугового разряда происходит за время  $10^{-6} \dots 10^{-4}$  с [17]. С учетом тепловой инерции деталей быстроедействие устройств может составлять  $10^{-2} \dots 10^{-1}$  с.

Более эффективным способом повышения устойчивости тлеющего разряда является секционирование электродов [18, 19]. В процессах сварки и пайки применяют замену монолитного анода на секционированный [20], отдельные секции (сегменты) которого соединены с положительным полюсом источника питания через развязывающие балластные сопротивления достаточно большого уровня —  $100 \dots 500 \text{ Ом}$  (рис. 3). В этом случае возникновение дуги на каком-либо участке катода или секции анода слабо влияет на режим горения тлеющего разряда на других секциях. При этом ток возникшей дуги ограничен значительным внешним балластным сопротивлением этой цепи. Воздействие дуги на соединяемые детали существенно снижается, однако не исключается возможность их повреждения при ее длительном горении.

Ограничение длительности существования возникшей дуги для системы электрически развязанных электродов достигается путем использования вращающегося электрического поля, обтекающего с определенной скоростью анодные секции [21]. Возникшая на любой из секций дуга в следующий момент оказывается выключенной из электрической цепи и вынуждена погаснуть. Для предотвращения повторного возбуждения дуги на этой секции при ее последующем включении скорость вращения электрического поля задается такой, чтобы за период обращения электрического тока в межэлектродном промежутке успели исчезнуть все флуктуации, вызванные кратковременным действием дуги. Частота переключения анодных секций должна удовлетворять двум противоречивым требованиям:

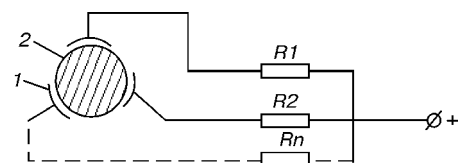


Рис. 3. Схема нагрева с использованием секционированного анода: 1 — анодные секции; 2 — катод;  $R_1, \dots, R_n$  — балластные сопротивления

быть достаточно высокой, чтобы ограничить длительность горения дуги на отдельной секции и соответственно снизить степень ее воздействия на изделие, и в то же время быть достаточно низкой, чтобы устранить условия для ее повторного возбуждения. Оптимальная частота переключения анодных секций для токов разряда 5...30 А составляет 500...2000 Гц и снижается с увеличением силы тока. В качестве элементов, коммутирующих анодные цепи необходимо применять высокочастотные или импульсные тиристоры.

Для стабилизации режима горения тлеющего разряда применяют источники питания с падающими или крутопадающими внешними характеристиками. Наиболее простым вариантом получения такой характеристики является применение источника с активным балластным сопротивлением (рис. 4, а) [6]. Это сопротивление выбирают в пределах от  $1/3$  до полного сопротивления разряда [22], составляющего в условиях сварки 50...150 Ом. Такая схема вносит значительные потери электрической энергии — КПД источника не превышает 0,4...0,6. Однако такие источники просты в изготовлении и эксплуатации, имеют высокую надежность, невысокие стоимость и массу (до 5 кг на 1 кВт), поэтому широко применяются в промышленных и лабораторных установках невысокой мощности. Замена в источнике питания активного балласта на реактивный, в качестве которого использовали индуктивно-емкостный преобразователь [23], позволила создать внешнюю характеристику, близкую к вертикальной, и благодаря этому расширить диапазон устойчивости тлеющего разряда. Потери энергии в таком балласте заметно ниже, и КПД источника возрастает до 0,7...0,8. Однако такие источники обладают значительной массой (от 11 до 22 кг на 1 кВт в зависимости от конструкции и мощности). Они значительно сложнее и дороже источников, описанных ранее, и имеют ограниченные пределы регулирования режима, потому широкого распространения не получили.

В установках повышенной мощности (10...30 кВт) применяют более экономичные управляемые источники питания разряда на основе вентильных преобразователей (рис. 4, б) [24]. Крутопадающая характеристика таких источников создается автоматическим регулированием тока. Они имеют высокое отношение полученной мощности к массе, при этом потери энергии не превышают 10 % общей мощности источника.

Технологические возможности тлеющего разряда в сочетании с относительно простым оборудованием обусловили перспективность применения его как источника нагрева в процессах сварки давлением с подогревом. В настоящее время он применяется для диффузионного соединения углеродистых и конструкционных сталей с твердыми сплавами при изготовлении режущего и штампового инструмента [25, 26]; соединения технических стекол с металлами [27], цветных металлов и сплавов, кроме алюминия, [28] в узлах приборов; железокобальтовых сплавов с нержавеющей стали при изготовлении мощных ультразвуковых преобразователей с сосредоточенными и распределенными параметра-

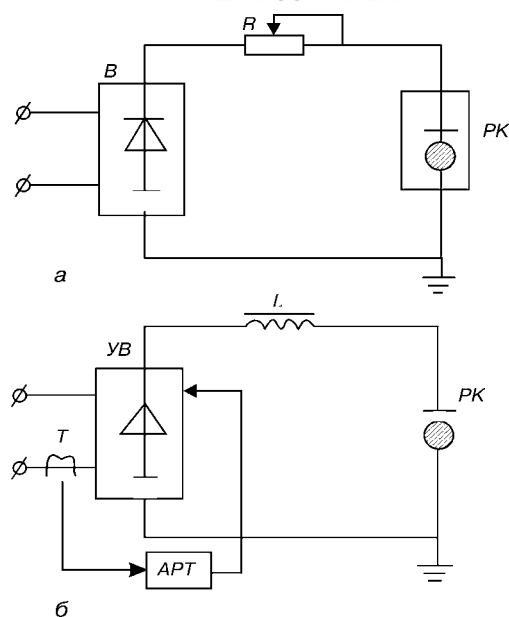


Рис. 4. Схемы источников питания тлеющего разряда с активным балластным сопротивлением (а) и на основе вентильных преобразователей (б): В — выпрямитель; УВ — управляемый выпрямитель; АРТ — автоматический регулятор тока; PK — разрядная камера; R — балластное сопротивление; L — сглаживающий реактор; Т — трансформатор

ми акустического поля [13] и др. Нашел применение тлеющий разряд и для пайки металлов, начиная от низкотемпературной пайки выводов миниатюрных резисторов [29] и узлов электровакуумных приборов [30] до высокотемпературной пайки крупногабаритных узлов из сталей и твердых сплавов [12, 31]. Специфическая способность тлеющего разряда проникать в зазоры, щели, углубления создает перспективы для экономичной сварки давлением сложных сотовых и других конструкций, имеющих малую тепловую инерцию [7] благодаря их равномерному объемному нагреву. Применяют тлеющий разряд и для активации соединяемых поверхностей ионной бомбардировкой. В работе [28] отмечается, что предварительная обработка меди разрядом при токе 0,32 А и давлении газа 1,3...13,3 Па обеспечила повышенную прочность соединения. Такой широкий круг проблем, решаемых с помощью сильноточного тлеющего разряда, объясняется его хорошей адаптивностью к изменяющейся номенклатуре изделий, простой переналадкой при смене типоразмеров и формы деталей, высокой энергетической эффективностью, низкой стоимостью оборудования ввиду отсутствия высоковакуумных систем и ламповых генераторов, возможностью автоматизации процесса. К настоящему времени разработаны и находятся в промышленном использовании одно- и многопостовые установки для диффузионной сварки в тлеющем разряде мощностью 3...30 кВт [24, 32] и для пайки мощностью до 60 кВт [33], работающие в ручном и полуавтоматическом режимах. Отмечается перспективность применения тлеющего разряда как в серийном [30], так и в единичном и ремонтном [25] производствах.

## Выводы

1. Сильноточный тлеющий разряд является перспективным и конкурентоспособным источником

энергии в процессах соединения материалов в твердой фазе. Для расширения его технологических возможностей необходимы дальнейшие исследования энергетических характеристик разряда, способов повышения его устойчивости, разработка методов и режимов ионной очистки и активации соединяемых поверхностей.

2. Перспективным направлением является создание автоматизированных установок для сварки и пайки в тлеющем разряде и проведения комплексных технологических процессов, включающих предварительные и послесварочные операции.

1. *Вашиш В. С.* Сварка и пайка металлов в тлеющем разряде // Автомат. сварка. — 1962. — № 4. — С. 23–25.
2. *Brandt B.* // J. Sci. Instr. — 1963. — 40, № 11. — P. 542–543.
3. *Trouzil Z.* // Czeschosl. Phys. J. B. — 1962. — 3, № 12. — P. 227–231.
4. *Диффузионная* сварка в тлеющем разряде / В. И. Дятлов и др. — Л.: ЛДНТП, 1968. — 26 с.
5. *Котельников Д. И.* Технология и оборудование диффузионной сварки в тлеющем разряде // Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. — М.: МТИММП, 1970. — С. 298–303.
6. *Котельников Д. И.* Тлеющий разряд как источник тепла в сварочных процессах (Обзор) // Автомат. сварка. — 1978. — № 4. — С. 15–21.
7. *Котельников Д. И.* Сварка давлением в тлеющем разряде. — М.: Металлургия, 1981. — 116 с.
8. *Голубовский Ю. Б., Флорко А. В.* О роли VV и VT-процессов в механизме нагревания газа в положительном столбе разряда в азоте // Теплофизика высоких температур. — 1980. — 18, № 4. — С. 870–873.
9. *Каган Ю. М., Паскалев К. К.* Газовая температура в положительном столбе разряда в гелии при средних давлениях // Журн. техн. физики. — 1974. — № 12. — С. 2585–2588.
10. *Грановский В. Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. — М.: Наука, 1971. — 543 с.
11. *Болотов Г. П., Раков А. А.* Повышение эффективности сварки в тлеющем разряде // Тез. докл. науч.-техн. конф. — Липецк, 1987. — С. 63–64.
12. *Большова А. И.* Использование энергии тлеющего разряда в качестве источника тепла для пайки // Пайка в машиностроении. — М.: МАТИ, 1974. — С. 136–139.
13. *Котельников Д. И., Болотов Г. П.* Экономия припоев при изготовлении магнотриггеров // Экономия материалов в технологических процессах пайки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 97–100.
14. *Болотов Г. П., Гребеніченко В. Я.* Геометричні та енергетичні характеристики позитивного стовпа тліючого розряду постійного та змінного струму // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. — 2001. — № 12. — С. 81–85.
15. *Пабад-Захрян А. А., Кузнецов Г. Д.* Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. — М.: Атомиздат, 1975. — 174 с.
16. *Ecker G., Kroll W., Zoller O.* // Phys. Fluids. — 1964. — № 7. — P. 2001.
17. *Hofert H. J.* // Ann. der Phys. — 1939. — № 35. — S. 547.
18. *Гайсин Ф. М., Сон Э. Е.* Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. — Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1989. — 432 с.
19. *Газовые лазеры* / Под ред. Р. Н. Солоухина. — Новосибирск: Наука, 1977. — 360 с.
20. *Сиваков А. Л.* Управление процессом диффузионной сварки // Обмен опытом в радиопром-сти. — 1987. — № 5. — С. 58–60.
21. *Болотов Г. П., Гребеніченко В. Я.* Совершенствование методов стабилизации сильнооточного тлеющего разряда, используемого в процессах сварки и пайки // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. — К.: НТУУ «КПІ», 1998. — Т. 4. — С. 303–306.
22. *Ecker G. et al.* // Phys. Fluids. — 1964. — № 12. — P. 2001.
23. *Котельников Д. И.* Применение оборудования для сварки и пайки в тлеющем разряде. — Чернигов: ВСНТО, 1981. — 57 с.
24. *Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде* / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов, А. П. Романенков, А. Л. Сиваков // Автомат. сварка. — 1985. — № 7. — С. 71–72.
25. *Довбищук М. Н.* Исследование, разработка процессов диффузионной сварки твердых сплавов со сталями с применением нагрева в тлеющем разряде: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев: КПИ, 1972. — 16 с.
26. *Садовников Б. В.* Диффузионная сварка в тлеющем разряде твердого сплава со сталью на опытном образце серийной установки ДС // Электротехн. пром-сть. Сер. электросварка. — 1982. — Вып. 4. — С. 3–5.
27. *Садовский А. А.* Прецизионная сварка стекла и кобальта без расплавления // Свароч. пр-во. — 1973. — № 2. — С. 22.
28. *Wierzschon T.* Zgrzewanie dyfuzyjne z zastosowaniem procesu bombardowanie jonego // Prz. Wpaw. — 1975. — № 11. — S. 71.
29. *Болотов Г. П.* Применение тлеющего разряда для пайки выводов резисторов // Автомат. сварка. — 1990. — № 9. — С. 64–65.
30. *Кузьминов Н. С., Деревянко И. А.* Установка для пайки узлов ЭВП в тлеющем разряде // Электрон. пром-сть. — 1974. — № 12. — С. 67–70.
31. *Зиновьева В. Ф., Гальцева С. М., Гилев В. А.* Высокотемпературная пайка изделий из нержавеющей стали с использованием тлеющего разряда // Автомат. сварка. — 1990. — № 6. — С. 60–63.
32. *Котельников Д. И., Левенец В. Н., Болотов Г. П.* Переносная установка для сварки в тлеющем разряде // Там же. — 1982. — № 1. — С. 74.
33. *Пайка в тлеющем разряде разнородных материалов и твердых сплавов* / В. Ф. Зиновьева, С. М. Гальцева, С. В. Емельянов, В. А. Гилев // Там же. — 1990. — № 11. — С. 71–73.

The paper gives the main results of investigation and development work aimed at improvement and enhancement of process capabilities of the glowing discharge as a heat source in welding processes. Promising methods for improvement of the discharge stability are demonstrated, and the main types of power sources and equipment are characterized. The range of processing tasks is outlined that are now being successfully solved by the processes of glowing discharge welding and brazing.

Поступила в редакцию 01.06.2001