

УДК 621.791

*Л. В. САМУСЕВА, Н. А. ОДИНЦОВ, М. Ю. ШЕРШНЁВ**Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь***ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ**

Приведена информация об истории возникновения сварки в среде защитного газа, существующих ее видах и областях применения. Рассмотрен технологический процесс аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. Представлены некоторые параметры, характеризующие процесс сварки. Обсуждаются условия, сопровождающие аргонодуговую сварку изделий из алюминия, нержавеющей стали и титана, а также титана со сталью.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, неплавящийся электрод, технология сварки, сварное соединение.

Введение. Сваркой называют технологический процесс получения неразъемных соединений в результате установления межатомных связей между свариваемыми деталями при их местном нагреве и/или пластическом деформировании [1]. В настоящее время сварка применяется практически во всех отраслях экономики для соединения элементов толщиной от нескольких микрон (в микроэлектронике) до нескольких метров (в тяжелом машиностроении) [2, 3].

Дуговая электрическая сварка была изобретена в начале XIX века. Уже тогда было замечено, что для получения качественного соединения металлов в процессе сварки требуется удаление кислорода, азота и водорода из расплава с целью предотвращения образования нежелательных пузырьков или пор. Это потребовало применения для защиты свариваемых деталей от воздействия окружающей среды сварочной ванны или дополнительных приспособлений [4].

В 1890 году было предложено техническое решение сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа [5] (рисунок 1, *а*). Но и в течение первой половины XX века возникали значительные трудности при сварке алюминия и магния, поскольку эти металлы при нагреве быстро вступают в реакцию с воздухом, что приводит к дефектам в структуре шва, которые снижают его прочность и способствуют быстрому разрушению соединения. В 1941 году был разработан технологический процесс сварки цветных металлов в защитной атмосфере гелия неплавящимся вольфрамовым электродом [6] (рисунок 1, *б*). Позднее в качестве защитной среды стали использовать аргон, который тяжелее кислорода и поэтому вытесняет его молекулы из области сварочной ванны, обеспечивая ее изоляцию от кислородной среды. Соответствующая сварка была названа аргонодуговой.

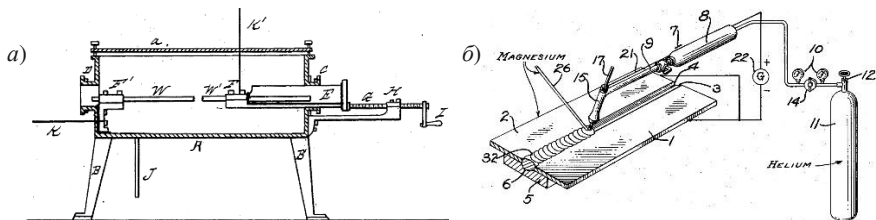


Рисунок 1 – Технические решения сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа по патентам [1] (а) и [2] (б)

В настоящее время существуют следующие разновидности аргонодуговой сварки: MMA (*Manual Metal Arc*) – ручная штучными (покрытыми) электродами; TIG (*Tungsten Inert Gas*) – ручная с использованием неплавящегося электрода под защитой инертных газов; MIG (*Metal Inert Gas*) – с плавящимся металлическим электродом (проволокой) в среде инертного/активного защитного газа с автоматической подачей присадочной проволоки. В США для автоматизированной (роботизированной) сварки TIG применяется аббревиатура GTAW (*Gas Tungsten Automatic Welding*).

К особенностям аргоновой сварки неплавящимся электродом относится возможность сваривать такие химически активные металлы, как алюминий, титан и их сплавы, нержавеющие стали, медь, бронзу, латунь, цирконий, молибден, никель и т. д. [7, 8]. Также возможно соединение друг с другом пористых [9] и разнородных материалов, например, углеродистых и легированных сталей, меди с латунью и др. Во многих отраслях промышленности аргонодуговая сварка применяется для сварки тонких заготовок, в первую очередь из цветных металлов. Фактически данный вид сварки позволяет осуществлять соединение наиболее широкой номенклатуры сплавов при разнообразных конфигурациях изделий. Он обеспечивает высокое качество сварных швов, дает возможность точного поддержания глубины проплавления металла, что весьма важно при сварке тонкого слоя металла в случае одностороннего доступа к поверхности изделия. Применение такой сварки открывает широкие возможности для развития областей техники и промышленности, связанных с работой в экстремальных условиях: авиации, химического машиностроения, производства железнодорожного подвижного состава, приборостроения, строительства.

В данной работе рассматриваются факторы, которые следует принимать во внимание при использовании аргонодуговой сварки для соединения деталей, изготовленных из металлов, которые находят широкое применение в конструкциях транспортных средств.

Технология аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. В этом случае дуга горит между свариваемым изделием и вольфрамовым электродом (рисунок 2). Через сопло горелки вдувается газ (аргон) защищающий электрод от взаимодействия с атмосферным воздухом. Со стороны в зону дуги подается присадочный материал, который не включается в электрическую цепь.

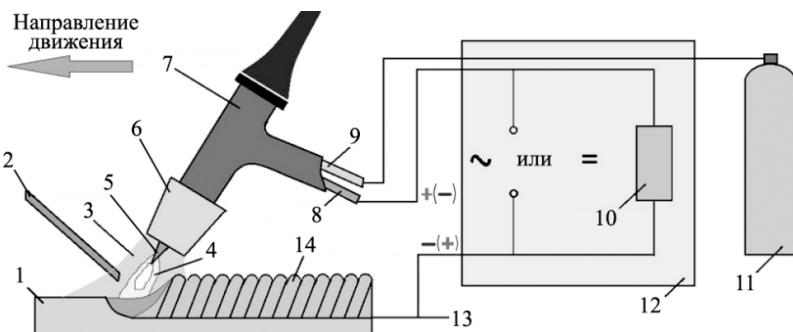


Рисунок 2 – Схема аргонодуговой сварки неплавящимся электродом:
 1 – обрабатываемое изделие; 2 – присадочная проволока; 3 – защитный газ; 4 – электрическая дуга; 5 – вольфрамовый электрод; 6 – сопло горелки; 7 – сварочная горелка; 8 – токопровод; 9 – канал подачи газа в горелку; 10 – осциллятор; 11 – баллон с аргоном; 12 – сварочный аппарат; 13 – заземление; 14 – сварной шов

Чаще всего неплавящийся электрод изготавливается из вольфрама. Из-за своей инертной природы аргон в зоне горения дуги не вступает в химические взаимодействия с расплавленным металлом и иными газами. Кроме того, будучи на 40 % тяжелее воздуха, он защищает сварочную ванну от взаимодействия с кислородом, вытесняя его из зоны сварки.

Перенос электродного металла при аргоновой сварке осуществляется крупнокапельным или струйным путем. При крупнокапельном наблюдаются значительное разбрызгивание металла и неустойчивость процесса сварки. Малое давление в дуге предопределяет значительный размер капель, что ведет к снижению технологических характеристик по сравнению с полуавтоматической сваркой в углекислом газе. Диапазон токов, при которых реализуется крупнокапельный перенос, достаточно велик, например, для проволоки диаметром $d = 1,6$ мм $I_{св} = 120 \dots 240$ А. Увеличение силы тока $I_{св}$ до 260 А приводит к струйному переносу, улучшению стабильности процесса сварки, уменьшению разбрызгивания [4]. При сварке на постоянном токе в случае его обратной полярности аргон становится средой с хорошей электропроводностью [10].

Зажигание дуги при сварке вольфрамовым электродом не может быть выполнено путем касания изделия. С одной стороны, ионизировать дуговой промежуток за счет искры между изделием и электродом достаточно сложно вследствие высокого потенциала ионизации аргона (при использовании плавящегося электрода дуга зажигается при соприкосновении проволоки с изделием вследствие появления паров железа, потенциал ионизации которых в 2,5 раза ниже, чем у аргона). С другой стороны, при соприкосновении изделия с вольфрамовым электродом он загрязняется и интенсивно оплавляется.

При аргоновой сварке неплавящимся электродом для зажигания дуги параллельно источнику питания подключается так называемый осциллятор

(см. рисунок 2), который подает на электрод высоковольтные импульсы, способные ионизировать дуговой промежуток и обеспечить зажигание дуги после включения подачи тока. Затем осциллятор переходит в режим стабилизатора, подавая импульсы на дугу при смене полярности, что обеспечивает устойчивое горение дуги и предотвращает деионизацию дугового промежутка.

При выполнении сварки на постоянном токе до 300 А на аноде выделяется 70 %, на катоде – 30 % тепла. Чтобы максимально проплавлять изделие при минимальном разогреве электрода, в большинстве случаев используется ток прямой полярности. Так свариваются титан, практически все стали. Алюминий для разрушения тугоплавкой оксидной пленки сваривают на переменном токе.

Чистый аргон в силу своей инертности не может защищать металл от влаги, различных включений и других загрязнений, которые попадают в зону сварки из присадочного металла или свариваемых кромок. Поэтому иногда к аргону добавляют 3–5 % кислорода. Он вступает в химические реакции с вредными примесями и способствует их превращению в соединения (шлаки), всплывающие на поверхность сварочной ванны, тем самым предотвращая пористость.

Сварка алюминия. Алюминий плавится при 627 °С, имеет относительно невысокую плотность (2700 кг/м³ против 7800 кг/см³ у стали), обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью. При нагреве и расплавлении он не изменяет своего цвета, поэтому степень его нагрева трудно контролировать. При температурах 400–500 °С, близких к температуре плавления, прочность алюминия и его сплавов резко падает [11], происходит значительное снижение их вязкости, что может стать причиной развития значительной деформации и разрушения металла в зоне нагрева под действием собственного веса.

Исходя из положения элемента в электрохимическом ряду напряжения металлов алюминий активно взаимодействует с кислородом, образуя на поверхности оксидную пленку Al_2O_3 . Из-за высокой температуры плавления (2050 °С) такую пленку трудно растворять флюсами, поэтому обычная дуговая сварка оказывается невозможной. Пленка оксида, покрывая капли расплавленного металла, препятствует сплавлению металла сварочной ванны с основным металлом и образование шва. Она загрязняет шов неметаллическими включениями и ведет к снижению его пластичности. Для получения высококачественного сварного соединения оксидную пленку следует удалять. До сварки это осуществляется химическими и механическими способами, а во время сварки – действием эффекта катодного распыления, который заключается в интенсивном нагреве локального участка при бомбардировке катода положительными ионами, что ведет к испарению металла и эмиссии электронов, приводящей к разрушению оксидной пленки. При сварке на переменном токе такое разрушение происходит в полупериод кривой тока, при котором основной металл является катодом. Во втором полупериоде происходит только нагрев металла. Вследствие значительных отличий физических характеристик изготовленного из вольфрама неплавящегося электрода и алюминиевого сплава основного металла при сварке

на переменном токе проявляется выпрямляющее действие сварочной дуги, которое неблагоприятно сказывается на качестве сварного соединения.

Сварка нержавеющей стали. Особенности нержавеющей стали, по сравнению с углеродистыми, являются более низкая теплопроводность, большие литейная усадка и коэффициент теплового расширения, повышенное омическое сопротивление. Коррозионная стойкость таких сталей объясняется образованием на поверхности плотной пассивной пленки оксида хрома Cr_2O_3 . Ее наличие и химическая активность хрома ведут к усложнению процесса сваривания вследствие повышенной склонности металла к охрупчиванию и росту зерна, последствия которого нельзя устранить термической обработкой.

Нержавеющие стали характеризуются высоким содержанием хрома и никеля и представляют собой твердый раствор углерода и легирующих элементов хрома, никеля и титана в γ -железе, что и определяет высокую коррозионную стойкость. При сварке таких сталей из-за нагрева в интервале температур 450–850 °C комплексные карбиды железа и хрома выпадают из твердого раствора, что ведет к обеднению хромом и повышению склонности стали к межкристаллитной коррозии. Чтобы предотвратить такое выпадение, сварка должна осуществляться при малой погонной энергии сварочными материалами, содержащими элементы-стабилизаторы, в качестве которых выступают ниобий и титан.

Учитывая структурные изменения, протекающие при нагреве свариваемого металла, при выборе режима сварки следует учитывать склонность основного металла и металла шва и околошовной зоны к образованию кристаллизационных трещин, поскольку не всегда удастся добиться, чтобы их механические характеристики оказались близкими к свойствам основного металла. Также требуется принимать меры по повышению стойкости к образованию пор, возникающих в результате насыщения металла водородом.

Изделия или элементы конструкции из нержавеющей стали свариваются на постоянном токе. При постоянной подаче присадочного материала угол между ним и электродом должен быть близок к 90°. Необходимо удалять образующуюся в процессе сваривания пленку оксида. По окончании сварочного процесса подача аргона не должна прекращаться, пока температура металла не снизится до 400 °C.

В целом при сварке нержавеющей стали требуется применение специальных присадочных материалов, выбор и соблюдение оптимальных режимов сварки [12]. В некоторых случаях проводится специальная термическая обработка сварных соединений.

Сварка титана. Титан относится к числу широко распространенных в природе металлов. Его температура плавления 1665 °C, выше, чем у железа (1539 °C), и он является тугоплавким металлом. Из всех тугоплавких материалов именно титан и его сплавы получили наиболее широкое применение в промышленности в качестве конструкционных материалов. Помимо высокой

жаропрочности титан и его сплавы обладают высокой удельной прочностью, которая сочетается с высокой коррозионной стойкостью при комнатной температуре. Благодаря высоким физико-механическим и физико-химическим характеристикам, высокой сопротивляемости коррозии сплавы титана применяются в самых разных отраслях промышленности.

Если при нормальных условиях титан имеет высокую коррозионную стойкость, то при высоких температурах он и его сплавы становятся весьма активными по отношению к кислороду, водороду и азоту. Они, а также углерод образуют с титаном твердые растворы внедрения и хрупкие оксиды, гидриды, нитриды и карбиды, которые являются вредными примесями, значительно снижающими механические характеристики металла.

При температурах выше 600 °С титан начинает взаимодействовать с кислородом воздуха, что приводит к образованию не только окислы, но и оксида титана TiO_2 . Хрупкий поверхностный слой оксида титана представляет собой твердый раствор кислорода в титане, который называют альфированным слоем. Его наличие ведет к образованию холодных трещин, поэтому допускается содержание кислорода не более 0,015 %. Склонность титана к образованию холодных трещин связана также с водородом, который при содержании его выше предельной растворимости охрупчивает металл в результате гидридного превращения. Азот, активно взаимодействуя с титаном, повышает его прочность, но снижает пластичность, поэтому в сплавах титана допускается содержание азота не более 0,05 %.

Изложенные факты свидетельствуют о значительных проблемах при использовании обычной сварки для соединения конструкций из титана и его сплавов, причем главнейшая из них связана с получением сварных соединений, обладающих высокой пластичностью. Поэтому сварка изделий из титана чаще всего осуществляется в среде чистого аргона, причем она может выполняться как плавящимся, так и неплавящимся электродом [13, 14].

При необходимости сварка титана со сталью также проводится в среде защитного газа аргона. Технологический процесс должен предусматривать материалы и режимы сварки, которые препятствуют образованию в сварных швах хрупких фаз $FeTi$ и Fe_2Ti . В этом случае для обеспечения надежности соединения могут использоваться комбинированные вставки из тантала и бронзы или бронзы и ниобия. Сварка проводится вольфрамовым электродом в камере с контролируемой атмосферой.

Заключение. Сварка – высокопроизводительный и экономичный процесс, который получил широкое распространение в различных отраслях промышленного комплекса. Аргонодуговая сварка – не самый простой, но один из самых эффективных видов сварки. В статье рассмотрены особенности, которые требуются принимать во внимание при выполнении аргонодуговой сварки неплавящимся электродом изделий из алюминия, нержавеющей стали и титана для обеспечения высокого качества сварных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ 2601-84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. – Дата введения 1985-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 55 с.
- 2 **Чернышов, Г. Г.** Сварочное дело. Сварка и резка металлов / Г. Г. Чернышов. – М. : Академия, 2013. – 492 с.
- 3 **Федин, А. П.** Сварочное производство / А. П. Федин. – Минск : Выш. шк., 1992. – 302 с.
- 4 **Лихачев, В. Л.** Электродуговая сварка : пособие для сварщиков и специалистов сварочного производства / В. Л. Лихачев. – М. : Солон-Пресс, 2017. – 639 с.
- 5 Method of welding by electricity : Pat. 419032 United States : CPC B 23K 11/04 / C. L. Coffin. – Filed 25.06.1889 ; Patented 07.01.1890. – 2 p.
- 6 Welding torch : Pat. 2274631 United States : IPC B 23K 35/22; B 23K 9/035; B 23K 9/23 / R. Meredith. – Filed 04.01.1941 ; Patented 24.02.1942. – 5 p.
- 7 **Murphy, A. B.** A Perspective on arc welding research: the importance of the arc, unresolved questions and future directions // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2015. – Vol. 35, is. 3. – P. 471–489.
- 8 Сварка жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР / К. Н. Коржов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 578–582.
- 9 **Rabiei, A.** A study on welding of porous metals and metallic foams / A. Rabiei, J. Cance, Z. Chacko // Advanced Engineering Materials. – 2024. – Vol. 26, is. 4. – Article 2301430.
- 10 **Патон, Б. Е.** Применение защитных газов в сварочном производстве (обзор) / Б. Е. Патон, С. Т. Римский, В. И. Галинич // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6–7. – С. 17–24.
- 11 **Дриц, А. М.** Влияние способа сварки на остаточные напряжения в сварных соединениях алюминиевого сплава 1565Ч / А. М. Дриц, В. В. Овчинников, П. Б. Резцов // Технология легких сплавов. – 2024. – № 2. – С. 23–32.
- 12 Study of the TIG welding process of thin-walled components made of 17-4 PH steel in the aspect of weld distortion distribution / M. Mróz [et al.] // Materials. – 2023. – Vol. 16, no. 13. – Article 4854. – 21 p.
- 13 Investigating the influence mechanism of different shielding gas types on arc characteristics and weld quality in TA2 laser-arc hybrid welding / H. Zhang [et al.] // Metals. – 2024. – Vol. 14, no. 8. – Article 946. – 17 p.
- 14 **Гареев, И. С.** Технологические особенности энергосберегающей аргонодуговой сварки корпусных конструкций из титанового сплава ОТ4 / И. С. Гареев, С. А. Собко, М. С. Писарев // Сварочное производство. – 2022. – № 8. – С. 39–46.

L. V. SAMUSEVA, N. A. ODINTSOV, M. Y. SHERSHNYOV
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

FEATURES OF AN ARGON-ARC WELDING TECHNOLOGY

The article provides information on the history of welding in a protective gas environment, its existing types and areas of application. The technological process of an argon-arc welding with a non-consumable electrode is considered. Some parameters characterizing the welding process are presented. The conditions accompanying argon-arc welding of products made of aluminum, stainless steel and titanium, as well as titanium with steel are discussed.

Keywords: argon-arc welding, non-consumable electrode, welding technology, welded joint.

Получено 29.10.2024