

УДК 621.791.75

РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ ДУГОВОЙ СВАРКИ В АКТИВНЫХ ГАЗАХ

А. П. ЛИТВИНОВ, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Рассмотрена история возникновения и развития дуговой сварки в активных газах. Отмечается, что этот способ сварки развивался по металлургическим и электродинамическим составляющим процесса. Максимальный эффект его применения достигнут при импульсном управлении плавлением электрода, а также использовании специальных составов электродных проволок и защитного газа.

Ключевые слова: сварочное производство, дуговая сварка, источник питания, сварка в активных газах, сварка в углекислом газе, металлургия сварки, электродная проволока, история техники

Дуговая сварка плавящимся электродом в углекислом газе в настоящее время нашла широкое применение в производстве стальных металлоконструкций. С первых лет создания промышленно пригодной технологии она стала важным средством механизации сборочно-сварочных работ, потеснив ручную дуговую сварку и полуавтоматическую шланговую под флюсом (шланговую), применявшихся в судо-, автомобиле-, вагоностроении и ряде других отраслей промышленности сначала в СССР, а вскоре и в других странах. Однако до настоящего времени не выполнен анализ развития этого вида сварки. В сборниках и монографиях, в том числе посвященных истории сварки, допущены неточности технологического характера, касающиеся сварки стержневыми электродами в смесях газов, составов проволок, свариваемых металлов, не выделены основополагающие технические решения и не выполнен системный анализ возникновения и развития технологий сварки в углекислом газе, не приведена последовательность развития этого способа сварки [1–4]. Известны работы, в которых рассмотрены преимущества дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе, ограничения, основные характеристики, возможности автоматизации и роботизации, способы управления переносом металла, рекомендации по выбору сварочной проволоки и режимов сварки [5].

В последней из работ [6], посвященной достижениям и проблемам сварки переменным током, отмечены особенности процессов плавления электродной проволоки, в том числе и в углекислом газе, и конструкции источников питания.

Однако до настоящего времени не выполнен анализ развития этого вида сварки.

Целью настоящей работы является систематизация и установление последовательности разработки основных способов дуговой сварки в активных газах, а также история расширения ее технологических возможностей.

Сварка угольным электродом в углекислом газе. В первом способе дуговой сварки, разработанном Н. Н. Бенардосом, ионы углерода участвовали в реакциях с кислородом и вытесняли воздух из зоны сварки, предотвращая окисление и азотирование металла [7]. В начале XX в. вернулась работа по улучшению качества, универсальности применения и повышению производительности процесса сварки. Были разработаны ацетилено-кислородная сварка и дуговая сварка штучными металлическими электродами с покрытиями. Однако в стационарных условиях стальные, чугунные и медные изделия продолжали сваривать и ремонтировать по способу Бенардоса [8]: для сварки угольной дугой алюминия и его сплавов на кромки наносили водные растворы солей фтора и хлора. В 1920-х годах в США делались попытки применить углекислый газ как средство защиты при сварке (Э. Томсон, компания «Дженерал электрик»), но положительных результатов получить не удалось, поскольку при сварке образовывались поры. С середины 1920-х гг. в Германии и ряде других стран интенсивно работали над проблемой автоматизации дуговой сварки, причем сварка угольным электродом рассматривалась как одна из наиболее перспективных технологий [9]. Е. О. Патон отмечал, что сварка угольным электродом находила за рубежом широкое применение [9]. В 1936 г. сотрудник ИЭС Н. Г. Остапенко разработал способ дуговой сварки угольным электродом в струе углекислого газа и атмосфере сгорающего бумажного шнура [8]. Благодаря такой защите можно менять полярность



процесса и улучшать управление тепловложением. К 1938 г. в ИЭС усовершенствовали полуавтоматическую и автоматическую сварку угольным электродом [10]. Сварка угольным электродом в углекислом газе продолжала применяться в 1940–1950-х годах как механизированная технология для серийного изготовления ряда стальных изделий [11]. Н. Г. Остапенко писал: «Струя углекислого газа, обдувая раскаленный угольный электрод, образует окись углерода, которая не является окислителем и поэтому может служить защитной атмосферой, предохраняющей расплавленный металл в зоне сварки от окружающего воздуха...» [12, с. 7]. Изделия из стали, сваренные угольной дугой в углекислом газе (канистры, электрические конденсаторы, сосуды щелочных аккумуляторов, тонкостенные резервуары, трубы и др.), соответствовали требованиям прочности и герметичности, предъявляемым к сосудам, работающим при нормальном давлении [12, 13]. Одновременно в ИЭС были сделаны попытки разработать технологию сварки в углекислом газе плавящимся электродом, однако положительного результата достигнуть не удалось [1].

Развитие металлургии сварки плавящимся электродом в углекислом газе. К концу 1930-х годов в США (фирма «Линде») и СССР (в ИЭС под руководством Е. О. Патона) создана автоматическая дуговая сварка железа и стали под слоем флюса [8]. В ИЭС высокого качества металла шва удалось достичь благодаря применению электродных кремнемарганцовистых проволок, изготовленных на заводах «Серп и Молот» и «Красный Профинтерн» [14, с. 28]. 14 февраля 1941 г. был утвержден ГОСТ 178–41 на сварочные проволоки, мас. %: до 0,16 С; 0,8...1,1 Mn; 0,6...0,9 Si, не более 0,04 S, не более 0,04 P [14 с. 34]. Е. О. Патон отмечал, что «... флюс или электродная проволока должны содержать марганца больше, чем необходимо получить его в металле шва» [14, с. 38]. Повышенное содержание кремния и марганца по сравнению с содержанием этих элементов в обычных конструкционных сталях было введено именно с целью раскисления. Идея применения кремнемарганцовистых проволок использована и К. В. Любавским в Центральном научно-исследовательском институте технологии машиностроения в отделе сварки, которым по совместительству руководил Е. О. Патон, при разработке флюсов новых составов [15].

В 1952 г. К. В. Любавским и Н. М. Новожиловым продемонстрирована возможность сварки сталей плавящимся электродом с использованием углекислого газа в качестве защиты (авторское свидетельство СССР № 104283 от 2 февр. 1952 г). Низкоуглеродистые стали и сталь 30ХГСА они сваривали с использованием известных электродных проволок (состав по ГОСТ 2246–51) с раскис-

лителями — марганцем и кремнием [16]. Однако при сварке стали Х18Н9Т несмотря на применение специальных проволок легирующие примеси выгорали [16, с. 6]. Плавление электродной проволоки протекало нестабильно, сопровождалось веерообразным разбрызгиванием. Авторы отмечали, что ввиду «... больших потенциальных возможностей использования этого процесса для автоматической и полуавтоматической сварки целесообразно дальнейшее изучение этого процесса с созданием необходимых электродных проволок и специальной аппаратуры» [16, с. 8]. Сильное разбрызгивание электродного металла и неудовлетворительное формирование шва они объясняли прежде всего интенсивным сжатием столба дуги вследствие отбора энергии на диссоциацию и ионизацию молекулярных газов по периферии столба [17]. Добиться стабильного протекания процесса стало одной из важнейших задач по созданию промышленной технологии и оборудования. В то же время, как известно, характер переноса капли зависит от совместного действия плавления электрода давлением дуги, сил поверхностного натяжения жидкого металла, тяжести и электродинамических, значения и направление которых изменяются в процессе образования и отрыва капли [18, 19].

Дальнейшее развитие сварки в углекислом газе пошло по двум направлениям, которые можно назвать металлургическим и магнитоэлектродинамическим, что в итоге привело к созданию современных технологий — регулированию электрофизических параметров. В зону сварки стали вводить вещества, изменяющие потенциал ионизации дугового разряда. В 1960–1970-х годах интенсивно разрабатывали составы электродных проволок и определяли параметры режимов; позже начался поиск составов защитных газов (МВГУ им. Н. Э. Баумана, ИЭС им. Е. О. Патона, Ростовский институт сельскохозяйственного машиностроения (РИСХМ) и др.). Основным металлургическим направлением стало целенаправленное изменение химического состава электродного металла как средство регулирования плавления и переноса металла в основном за счет введения в зону сварки элементов с низким потенциалом ионизации (солей щелочных, щелочноземельных элементов) и различных легирующих элементов. Наиболее практичным и эффективным признано применение порошковой проволоки. В 1957 г. И. К. Походней разработаны составы электродных проволок для наплавки в углекислом газе (ИЭС им. Е. О. Патона) [20]. Порошковая проволока продолжала совершенствоваться, диапазон ее применения распространился на сварку в углекислом газе легированных и теплоустойчивых сталей, сталей повышенной прочности, а также наплавку [21, 22].



Нанесение на проволоку Св-08Г2С тонкого слоя активаторов, добавление в состав плавящегося электрода редкоземельных металлов (0,03...0,07 %) позволило улучшить технологические свойства процесса, повысить стабильность горения дуги, снизить потери металла на разбрызгивание и содержание азота и водорода в металле швов. При использовании в качестве активатора водного раствора углекислых солей цезия и натрия удалось получить устойчивый струйный перенос металла. Установлено, что при активации электрода на закритическом для стандартной кремнемарганцовистой проволоки токе дуга в углекислом газе становится пространственно устойчивой. При импульсно-дуговой сварке с прерывисто-струйным переносом электродного металла потери его на разбрызгивание уменьшились до 3...5 % [23–26]. Для обеспечения высоких механических свойств металла шва В. И. Ульяновым и другими специалистами ИЭС им. Е. О. Патона предложено легировать проволоку Св-08Г2С алюминием (до 0,01 %) [27]. В 2000 г. разработаны композитные сварочные проволоки на основе единой унифицированной матрицы с сердцевиной, состоящей из обогащенной микролегирующими модифицирующими или флюсующими добавками в несвязанном с примесями состоянии в изолирующей оболочке [28].

В 1974 г. в ИЭС им. Е. О. Патона было доказано, что при сварке в углекислом газе с добавкой кислорода (до 30 %) проволока должна содержать повышенную массовую долю кремния или быть дополнительно легирована титаном и алюминием [29]. Для уменьшения разбрызгивания и исключения образования оксидной пленки на поверхности шва при сварке кислотостойких сталей предложена комбинированная газовая защита зоны сварки с подачей из отдельных сопел аргона и углекислого газа [30]. Разработку составов газов и повышение качества защиты зоны сварки выполняли и при решении других проблем. Так, сварка в смеси $Ar + O_2 + CO_2$ по сравнению со сваркой в углекислом газе и под флюсом обеспечивает более высокое сопротивление металла шва зарождению трещин [17, 31, 32]. В последние десятилетия основное внимание уделялось увеличению производительности сварки за счет применения смесей газов $CO_2 + 25...30\% He$, что намного увеличивает скорость подачи проволоки и обеспечивает стабильность процесса [33].

Исследование электрофизических явлений и разработка источников питания. Для расширения области применения сварки в углекислом газе следовало разработать способы управления плавлением и переносом электродного металла. Наиболее перспективными считали импульсно-дуговые процессы, связанные с изменением электрических параметров режима. В течение 1940–

1950-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона накоплен большой опыт исследования процессов и внедрения дуговой сварки тонкой проволокой под флюсом. Б. Е. Патон, изучая электроэнергетические характеристики процессов дуговой сварки, определил условия сварки с саморегулированием плавления электродной проволоки и требования к элементам сварочной цепи [34, 35]. В ИЭС им. Е. О. Патона была установлена возможность управления плавлением и переносом электродного металла, а также другими характеристиками процесса за счет импульсов тока или программирования изменений мгновенной мощности. Импульсно-дуговая сварка с постоянной скоростью подачи электрода и принудительными короткими замыканиями в инертных газах впервые осуществлена в 1953 г. А. В. Петровым в Научно-исследовательском институте авиационных технологий (НИАТ) [36].

В 1956 г. ИЭС и в НИАТ разработан процесс сварки в углекислом газе тонкой проволокой диаметром 0,6...1,2 мм, протекающий с принудительными короткими замыканиями дугового промежутка [37, 38]. Приступив к исследованиям нового процесса, Б. Е. Патон установил следующее: «Сварочная дуга в углекислом газе более контрагирована, чем в аргоне, имеет возрастающую вольт-амперную характеристику и обладает свойством саморегулирования; в углекислом газе целесообразно применять источники питания постоянного тока с жесткой либо возрастающей внешней характеристикой. Большой интерес представляет применение сварочных полупроводниковых выпрямителей, схема которых снабжена необходимыми обратными связями ...». Б. Е. Патон отмечал, что «... решение по применению переменного тока для питания дуги в углекислом газе следует искать в активировании электродной проволоки, а также применении специальных сварочных трансформаторов с обратными связями и импульсным зажиганием дуги» [39, с. 6].

В ИЭС им. Е. О. Патона было доказано, что при повышенной плотности тока в плавящемся электроде устойчивость процесса сварки может быть достигнута в случае использования в качестве источника питания генератора постоянного тока с жесткой характеристикой. Импульсно-дуговая сварка с постоянной скоростью подачи электрода была разработана в ИЭС им. Е. О. Патона в 1956 г. [38]. В последующие годы импульсно-дуговые процессы продолжали разрабатывать в ряде других стран [40, 41]. К началу 1970-х гг. сформировались основные виды импульсно-дуговой сварки: с непрерывным горением дуги; с принудительными короткими замыканиями разрядного промежутка, в том числе с принудительными обрывами дуги [42–45]. Сварку с непрерывным горением дуги обычно ведут с наложением импульсов тока одинаковых параметров или группы импульсов



различных параметров. Процесс с принудительными короткими замыканиями достигается, как правило, программирование тока при сварке в углекислом газе тонкой проволокой [46, 47].

Основной задачей совершенствования оборудования, которую решали в ИЭС, РИСХМ, фирме «Линкольн электрик» (США) и других фирмах, являлось управление процессом массопереноса электродного металла не с помощью традиционного формирования импульсов, отрывающих капли электродного металла и реализующего таким образом сварку без коротких замыканий (режим «пульс»), а принудительным формированием коротких замыканий путем управления током и напряжением на дуге. В ИЭС им. Е. О. Патона разработан процесс, при котором принудительные короткие замыкания дугового промежутка каплями электродного металла происходят под действием кратковременных импульсов тока. Для стабилизации процесса сварки, особенно для снижения разбрызгивания, найдены оптимальные соотношения между напряжением и током, разработаны источники питания с соответствующими динамическими свойствами. Установлена связь между параметрами переноса металла и характеристиками источника питания такими, как индуктивность цепи, сопротивление короткого замыкания и др. Отработаны механизмы подачи, системы управления режимом, созданы полуавтоматы, в том числе и для двухрежимной сварки [48–51]. К 1970 г. впервые была осуществлена автоматическая сварка переменным током в углекислом газе [52]. В последующие годы эта технология совершенствовалась на новой технической базе; были созданы стабилизаторы горения дуги с двойным управлением [53, 54].

Оба направления усовершенствования сварки в углекислом газе использовались для создания технологии сварки конкретных металлов и изделий. Многие задачи удалось решить с помощью импульсного управления током и мощностью дуги с программируемой подачей защитных газов (углекислого и газовых смесей с аргоном) в зону сварки. С этой целью разработано оборудование для автоматической и полуавтоматической сварки: специализированные источники питания, блоки модуляции вида защитных газов с различными физико-химическими свойствами и устройства для синхронизации их подачи. Решена проблема сварки различных сталей малой, средней и большой толщины на сварочном токе 8...300 А [55].

С 1930-х годов в СССР разработаны и нашли широкое применение вибродуговая наплавка и сварка, при которых электромагнит переменного тока заставляет вибрировать электрод, то приближая его к изделию, то удаляя; дуга может питаться как постоянным, так и переменным током [56]. Принудительные колебания электрода

непрерывно производят короткие замыкания и зажигание дуги. Принцип вибрации был совмещен с импульсным питанием дугового процесса при сварке в углекислом газе. В последнее десятилетие прошлого века фирмой «Фрониус» (Австрия) разработано оборудование, позволяющее реализовать не только процессы сварки и наплавки МИГ и МАГ постоянной и импульсной дугой, но и управлять сварочным процессом путем динамического регулирования скорости подачи проволоки. В момент короткого замыкания проволока отдергивается, при этом перенос металла происходит под действием сил инерции. Благодаря незначительному току короткого замыкания процесс сварки происходит практически без разбрызгивания и с минимальным нагревом основного металла. Технология была названа «Cold Metal Transfer» — перенос холодного металла [57]. Для контроля короткого замыкания и оптимизации процесса сварки разработан цифровой управляемый микропроцессор и регулируемый в цифровом режиме инверторный источник сварочного тока с интегрированным функциональным пакетом; оборудование пригодно для функционирования с роботами, имеющими различные принципы управления.

Разработка техники сварки в углекислом газе и ее внедрение. Разработанная в 1940-х годах сварка угольной дугой в атмосфере углекислого газа благодаря своей высокой производительности и дешевизне начала вытеснять ацетилено-кислородную сварку в производстве изделий из тонколистовой (0,5...3 мм) стали. Держатель с угольным электродом и соплом можно легко перемещать вручную или укрепить на тележке с точным копированием контура шва и автоматической подачей угольного электрода по мере сгорания. Для массового производства небольших изделий спроектированы специализированные станки, выполняющие сборку и перемещение заготовок. При этом сократился объем операций, выполняемых вручную и также исключались промежуточные операции [12].

Промышленные образцы оборудования для механизированной сварки плавящимся электродом были разработаны достаточно быстро. Пригодился опыт конструирования Б. Е. Патонам длинных гибких шлангов, подающих механизмов, держателей и других элементов оборудования полуавтоматической (шланговой) сварки под флюсом [58]. Сварочные головки опытных установок в ИЭС им. Е. О. Патона изготавливали на основе подающего механизма полуавтомата ПШ-5. В 1957 г. в ИЭС был создан серийный образец такого полуавтомата, а в 1958 г. спроектированы специализированные станки-автоматы для сварки в углекислом газе. В частности, была решена проблема автоматизации сварки малогабаритных



деталей, тонколистовых конструкций, вертикальных и потолочных швов.

Следует отметить, что, если физико-химические процессы, технология и материалы продолжали совершенствоваться, то механическая часть оборудования была сконструирована наиболее рационально. Первое время сварку тонкой проволокой выполняли от сварочного генератора с жесткой характеристикой. Для обеспечения стабильности процесса сварки и уменьшения разбрызгивания сварку осуществляли при определенных соотношениях напряжения и тока. Внешние характеристики источника формировали путем изменения магнитного потока размагничивания генератора и другими способами.

Усовершенствование источников питания велось в соответствии с требованиями технологии (в первую очередь с учетом управления характером плавления электродов) на новых элементных базах, по мере того, как создавались новые поколения электронной техники [47, 49, 59]. Для управления процессом сварки использовали различные системы слежения и компьютеры. Так, оптико-электронная система слежения за сварочным соединением, спаренная с микрокомпьютером, обеспечивает контроль высокой точности при автоматической дуговой сварке металлическим электродом в среде защитных газов [60]. В конце 1999-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона был разработан универсальный технологический комплекс для автоматической и механизированной дуговой сварки плавящимся электродом, включающий специализированный источник питания, блок модуляции вида защитных газов (аргона, углекислого газа и газовых смесей) и устройство синхронизации рода сварочного тока с видом защитного газа [61].

Статьи о работах в СССР по созданию сварки плавящимся электродом в углекислом газе в 1950-х годов были перепечатаны за рубежом и вскоре фирмы США, Швеции, Великобритании и других стран уже выпускали аппаратуру для этого процесса.

Выводы

1. При создании дуговой сварки плавящимся электродом в углекислом газе использованы полувековой опыт применения сварки угольным электродом для производства стальных изделий и кремнемарганцовистая проволока, разработанная для сварки под флюсом.

2. Совершенствование технологий сварки в углекислом газе шло в направлении улучшения электрофизических параметров процесса путем введения в зону сварки веществ, изменяющих потенциал ионизации дугового разряда, и разработки способов управления плавлением и переносом

электродного металла импульсным изменением электрических параметров режима.

3. Наибольший эффект достигнут при импульсном управлении током и мощностью дуги с программируемой подачей в зону сварки защитных газов (углекислого газа и газовых смесей).

1. *Дуговая сварка в защитном газе. Дуговая сварка в вакууме* / А. Г. Потаповский, А. В. Петров, А. М. Суптель, В. М. Ямпольский // Сварка в СССР. — Т. 1. — М.: Наука, 1982. — С. 239–267.
2. *Simonson R. D. The history of welding.* — Illinois: Morton Grove, 1969. — 420 p.
3. *Manna F. Storia della saldatura.* — Napoli: Edizioni scientifiche Italiane, 1979. — I — 539 S; II — 469 S.
4. *Потаповский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом.* — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
5. *Sadler H. A look at the fundamentals of gas welding* // *Welding J.* — 1999. — 78, № 5. — С. 45–59.
6. *Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги* / Б. Е. Патон, И. И. Заруба, В. В. Дыменко, А. Ф. Шатан. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 248 с.
7. *Бенардос Н. Н. Научно-технические изобретения и проекты.* Избран. тр. — Киев: Наук. думка, 1982. — 239 с.
8. *Чеканов А. А. История автоматической электросварки.* — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 157 с.
9. *Патон С. О. Праці в галузі електрозварювання* // *Вісті АН УРСР.* — 1937. — № 6. — С. 11–27.
10. *Збірник праць Інституту електрозварювання Академії наук УРСР / За ред. Є. О. Патона.* — К.: Вид-во АН УРСР, 1937. — 161 с.
11. *Остапенко Н. Г. Автоматическая сварка бортовых швов угольным электродом в атмосфере углекислого газа* // Юбилейный сборник, посвященный 80-летию Е. О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — С. 53–59.
12. *Остапенко Н. Г. Автоматическая сварка бортовых швов угольной дугой, стабилизированной струей углекислого газа* // *Автоген. дело.* — 1951. — № 5. — С. 5–9.
13. *Кирдо И. В., Лебедев В. К. Берзин А. И. Сварка неповоротных стыков тонкостенных труб угольным электродом в атмосфере углекислого газа* // *Автомат. сварка.* — 1957. — № 3. — С. 44–50.
14. *Патон Е. О. Скоростная автоматическая сварка под флюсом.* Избран. тр. — В 3-х т. — Киев: Изд-во АН УССР, 1961. — Т. 3. — 558 с.
15. *Любавский К. В. Разработка флюсов для скоростной сварки сталей Ст2 и Ст3 стандартной электродной проволокой* // *Автоген. дело.* — 1941. — № 6. — С. 25–31.
16. *Любавский К. В., Новожилов Н. М. Сварка плавящимся электродом в атмосфере защитных газов* // *Там же.* — 1953. — № 1. — С. 4–8.
17. *Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах.* — М.: Машиностроение, 1979. — 231 с.
18. *Дятлов В. И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке* // *Новые проблемы сварочной техники.* — Киев: Техніка, 1964. — С. 167–182.
19. *Ронский Л. М. Перенос металла при сварке в углекислом газе* // *Автомат. сварка.* — 1960. — № 10. — С. 28–35.
20. *Походня И. К. Проволока для наплавки износостойких сталей в среде углекислого газа* // *Там же.* — 1957. — № 3. — С. 51–54.
21. *Походня И. К., Головкин В. Н. Высокопроизводительная порошковой проволока для сварки в углекислом газе* // *Там же.* — 1974. — № 7. — С. 66–68.
22. *Походня И. К., Шлепаков В. Н., Супрун С. А. Сварочная порошковая проволока типа Э60 для сварки в углекислом газе* // *Труды Всесоюзной конференции по сварочным материалам.* — Киев: Наук. думка, 1982. — С. 121–127.
23. *Особенности переноса металла при сварке активированной проволокой в углекислом газе током прямой полярности* /

- Н. М. Будник, В. М. Евченко, Ю. Г. Белоусов, В. Х. Мацука // Свароч. пр-во. — 1971. — № 7. — С. 28–31.
24. Патон Б. Е., Шейко П. П. Автоматическое управление процессом импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1967. — № 1. — С. 3–8.
 25. Аснис А. Е., Слуцкая Т. М. Возможности снижения содержания марганца в электродных проволоках для сварки в активных газах // Там же. — 1982. — № 8. — С. 71–72.
 26. Дюргеров Н. Г., Щекин В. А., Небылицын Л. Е. Импульсно-дуговая сварка в углекислом газе активированным электродом // Свароч. пр-во. — 1975. — № 10. — С. 22–23.
 27. Ульянов В. И., Литвинчук С. М., Высоцкий Г. А. Влияние алюминия на технологические свойства сварочной проволоки типа Св-08Г2С // Автомат. сварка. — 1972. — № 1. — С. 8–9.
 28. Панин В. Н. Новые подходы в улучшении качества известных и создании новых сварочных материалов // Современные проблемы и достижения в области сварки и родственных технологий и оборудования на рубеже XXI века. — С.-Пб., 2000. — С. 25–29.
 29. Переход примесных элементов из проволоки в наплавленный металл при сварке в смеси углекислого газа с кислородом / Т. М. Слуцкая, А. Е. Аснис, А. Я. Тюрин, Е. С. Левченко // Автомат. сварка. — 1974. — № 11. — С. 68.
 30. Лаврищев В. Я. Автоматическая сварка стали с двойной газовой защитой // Там же. — 1970. — № 2. — С. 41–43.
 31. А. с. 247430 СССР, МКИ Н 05 В. Способ импульсно-дуговой сварки / Б. Е. Патон, А. Г. Потапьевский. — Оpubл. 04.07.69; Бюл. № 22.
 32. Сварка в смеси активных газов / А. Е. Аснис, Л. М. Гутман, В. Р. Покладий, Я. М. Юзькив. — Киев: Наук. думка, 1982. — 215 с.
 33. Miller N. A., Salter G. R. Effects of nitrogen in CO₂ welding // British Welding J. — 1964. — № 1. — P. 25–28.
 34. Патон Б. Е. Сварочные головки и питание их током. — Киев: Изд-во АН УССР, 1947. — 67 с.
 35. Патон Б. Е. Импульсное зажигания дуги с целью значительного снижения напряжения сварочного трансформатора // Автомат. сварка. — 1954. — № 4. — С. 46–52.
 36. Петров А. В. Дуговая сварка нержавеющей стали плавящимся электродом в среде инертных газов // Вест. машиностроения. — 1954. — № 9. — С. 68–70.
 37. Сварка в углекислом газе / И. И. Заруба, Б. С. Касаткин, Н. И. Каховский, А. Г. Потапьевский. — Киев: Гостехиздат УССР, 1960. — 224 с.
 38. Заруба И. И. Полуавтоматическая сварка тонкой стали плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1957. — № 3. — С. 9–21.
 39. Патон Б. Е. Газоэлектрическая сварка и рациональные области ее применения // Там же. — 1957. — № 3. — С. 1–8.
 40. Erdman-Jesnitz F. Beitrag zur Veränderung des Abschmelzcharakter von ummantelten Elektroden durch den elektrischen Anschlußkreis // Schweissen und Schneiden. — 1959. — № 12. — S. 447–454.
 41. Wilson R. A. Vapor — shielded arc welding at 200 ipm // Welding J. — 1961. — № 1. — P. 13–17.
 42. Патон Б. Е., Потапьевский А. Г., Подола Н. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автомат. сварка. — 1964. — № 1. — С. 1–6.
 43. Патон Б. Е., Потапьевский А. Г. Виды процессов сварки в защитных газах стационарной и импульсной дугой // Там же. — 1973. — № 9. — С. 1–8.
 44. Управление процессом дуговой сварки путем программирования скорости подачи электродной проволоки / Б. Е. Патон, Н. М. Воропай, В. Н. Бучинский и др. // Там же. — 1977. — № 1. — С. 1–5, 15.
 45. А. с. 1313140, МКИ В 23 К 9/18. Способ дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / И. И. Заруба, Ю. Н. Сараев, А. Ф. Князьков, А. К. Тимошенко. — Оpubл. 15.01.87; Бюл. № 15.
 46. Потапьевский А. Г., Лапчинский В. Ф. Динамические свойства источников тока для сварки в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1963. — № 9. — С. 42–47.
 47. Лебедев В. К., Медведенко Н. Ф. Исследование влияния переходных процессов на разбрызгивание металла при сварке в углекислом газе // Там же. — 1968. — № 5. — С. 11–14.
 48. Двухрежимный полуавтомат для сварки тонкой электродной проволокой при повышенной плотности тока / Ю. Г. Белоусов, А. Н. Михайлов, В. М. Евченко, В. П. Соболев // Свароч. пр-во. — 1969. — № 4. — С. 47–48.
 49. Модернизация типовых источников питания применительно к сварке в углекислом газе / Н. Ф. Медведенко, И. И. Заруба, М. Н. Сидоренко, В. В. Басанский // Автомат. сварка. — 1970. — № 6. — С. 53–56.
 50. Заруба И. В., Дыменко В. В., Баргамен В. П. Сварка переменным током в углекислом газе // Там же. — 1973. — № 10. — С. 64–68.
 51. Бучинский В. Н. Импульсно-дуговая сварка с замыканиями разрядного промежутка // Там же. — 1980. — № 12. — С. 64–66.
 52. Заруба И. И., Дыменко В. В. Стабилизаторы горения дуги переменного тока с двойным управлением // Там же. — 1982. — № 5. — С. 43–46.
 53. Шейко П. П., Жерносеков А. М. Технология и оборудование для сварки плавящимся электродом с программируемым изменением газовой защиты и модуляцией сварочного тока // Сварщик. — 2003. — № 4. — С. 4.
 54. Пат. 43424 Украина, МКИ В 23 К 9/167. Спосіб дугового зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів / Б. Є. Патон, В. К. Лебедев, П. П. Шейко та ін. — Оpubл. 17.12.2004; Бюл. № 11.
 55. Многоцелевой источник питания для дуговых способов сварки плавящимся электродом / П. П. Шейко, В. М. Павшук, В. Е. Пузаненко и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 56–57.
 56. Хренов К. К. Сварка, резка и пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1970. — 408 с.
 57. Бондаренко В. Л. Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» // Автомат. сварка. — 2004. — № 12. — С. 55–58.
 58. Патон Б. Е. Сварка длинным гибким электродом под флюсом // Автоген. дело. — 1945. — № 1. — С. 1–2.
 59. Быховский О. Г., Скоморохов В. М. Расчет тока и напряжения на дуге при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1973. — № 11. — С. 72.
 60. Kuhne A. N., Frassek B., Starke G. Components for the automated GVAW process // Welding J. — 1984. — № 1. — P. 31–34.
 61. Технология и оборудование для сварки плавящимся электродом с программируемым изменением газовой защиты и модуляцией сварочного тока // Сварщик. — 2003. — № 4. — С. 4.

Analysed is the history of emergence and development of welding in active gases. It is noted that this welding method was development on the basis of progress in metallurgical and electrodynamic components of the process. The maximal effect of its application was achieved with pulsed control of electrode melting, as well as with utilisation of special compositions of electrode wires and shielding gas.

Поступила в редакцию 29.01.2008,
в окончательном варианте 04.02.2008