



## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА TIG-F СВАРКИ (A-TIG) (Обзор)

**В. Н. ЗАМКОВ**, д-р техн. наук, **В. П. ПРИЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены результаты исследований влияния флюсов на процесс дуговой сварки вольфрамовым электродом в аргоне. Особое внимание уделено анализу причин, вызывающих повышение технологических характеристик дуги, в частности увеличению глубины проплавления. Предполагается, что последнее обусловлено ростом силы Лоренца за счет контракции дуги флюсом и повышения плотности тока в анодной области. Влияние на проплавление изменения градиента поверхностного натяжения жидкого металла в сварочной ванне имеет второстепенное значение.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, вольфрамовый электрод, аргон, плазма дуги, плотность тока, глубина проплавления, флюс, диссоциация

В последние годы внимание исследователей и производителей привлекает дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса, т. е. A-TIG. Глубокое проплавление металла, узкие швы, небольшая протяженность зоны термического влияния, относительно низкая погонная энергия и, как следствие, уменьшение остаточных сварочных деформаций — вот неполный перечень преимуществ A-TIG сварки.

В то же время относительно основной причины, определяющей эти преимущества — глубокого проплавления, мнения исследователей диаметрально противоположны. Ряд авторов считает, что флюс уменьшает поверхностное натяжение жидкого металла, кардинально изменяет направление конвективных потоков и теплопереноса в сварочной ванне, что в свою очередь способствует увеличению глубины проплавления. Другие авторы видят причину этого явления в сжатии дуги и увеличении ее давления на расплавленный металл.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы на основе анализа результатов опубликованных работ и многолетних исследований самих авторов дать наиболее достоверную трактовку процессов и явлений, вызывающих увеличение глубины проплавления при A-TIG сварке.

Процесс дуговой сварки вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса разработан в ИЭС им. Е. О. Патона в середине 1960-х гг. вначале для титана, а затем для сталей и сплавов на основе меди [1–5] и получил широкое промышленное применение. Презентация этого процесса в Британском институте сварки (1993 г.) привлекла к нему внимание специалистов ряда стран и послужила толчком для его дальнейшего всестороннего изучения. Это связано с тем, что применение флюсов при сварке вольфрамовым электродом в среде инертных газов оказывает существенное влияние на процесс сварки и прежде всего на формирование швов. Наличие слоя флюса на свариваемых кромках значительно расширяет технологические возможности и повышает эффективность TIG сварки [6–8].

Такое влияние флюсов зафиксировано при TIG сварке сплавов с самыми различными теплофизическими и физико-химическими свойствами, например, разного класса сталей [7–9], сплавов титана [10], меди [11], никеля [12], магния [13] и др. и, следовательно, имеет универсальный характер. Поэтому сварку по слою флюса можно рассматривать как самостоятельный процесс или, по крайней мере, как разновидность дуговой сварки вольфрамовым электродом в инертной среде подобно плазменно-дуговой сварке. Здесь следует отметить некорректность, по нашему мнению, названия A-TIG для этого способа сварки, поскольку флюсы, применяемые для TIG сварки, не влияют на энергию активации каких-либо процессов, никакие процессы не активизируют и поэтому не являются «активаторами» чего-либо. Более подходящим названием для этого способа сварки могла бы служить аббревиатура TIG-F.

В первых же публикациях, посвященных изучению влияния флюсов на процесс аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом, отмечен ряд явлений в дуге, которые затем были подтверждены дальнейшими исследованиями. Установлено, что независимо от свойств основного металла наличие флюса в зоне сварки приводит к сжатию (контракции) столба дуги и повышению напряжения дуги [2, 13–16]. Флюс увеличивает плотность тока на аноде [8, 17, 18], повышает абсолютное значение и градиент температуры в плазме дуги [13, 19, 20]. Следует отметить, что глубина провара и степень указанных изменений в сварочной дуге взаимосвязаны и зависят при прочих равных условиях от химического состава флюса и его количества на свариваемых кромках [8, 9, 13, 14, 21, 22].

Известны и основные причины контракции дуги. Это прежде всего уменьшение размеров области, где возможно существование анодного пятна. Давление дуги и поток защитного газа оттесняют расплавленный флюс на периферию сварочной ванны и прилегающий к ней участок основного металла. В результате благодаря резкому различию электропроводности жидкого металла и расплавленного флюса, вокруг сварочной ванны образуется электроизоляционный слой [14, 20], и сварочный ток проходит лишь через центральную часть сварочной ванны, ограниченную этим слоем. Ее размеры определяются адгезией флюса к свариваемому ме-



таллу, т. е. энергией Гиббса реакций взаимодействия между ними [2, 23].

Не менее важную роль в контракции сварочной дуги играют пары флюса и продуктов его взаимодействия со свариваемым металлом [2, 6, 8, 10, 13–15, 23–26]. Однако мнения исследователей по поводу механизма контракции здесь не однозначны. Это главным образом вызвано различными представлениями о наличии и характере распределения паров в дуговом промежутке. Так, авторы работ [13, 15, 24] предполагали наличие паров флюса, основного металла и даже вольфрамового электрода [13] в столбе дуги, катодной и анодной областях. Это не позволило им [24] объяснить неизменность эффективного потенциала ионизации и повышение температуры в столбе дуги при введении в зону сварки флюсов, содержащих элементы с низким потенциалом ионизации. Более того, предложенная ими модель контракции дуги отрицательными ионами галогенов [24] не подтверждается экспериментально, поскольку она предполагает, что, например, хлоридный флюс является универсальным для сварки металлов с различными физико-химическими и теплофизическими свойствами.

В работе [15] контракция дуги флюсом при сварке сталей рассматривается исключительно с позиций содержания в нем электроотрицательных элементов, в частности кислорода. Основное внимание при этом уделяется химическим реакциям на поверхности сварочной ванны и взаимодействию плазменных потоков в дуге. Однако следует иметь в виду, что чисто фторидный флюс [27], при использовании которого подобные химические реакции невозможны, обеспечивает при сварке сталей не менее значительную контракцию дуги и глубину проплавления, чем флюсы, содержащие оксиды.

И только в работе [13] было высказано предположение, что пары флюса при сварке, вероятнее всего, находятся в периферийной области дуги.

Экспериментально установлено [28–30], что плазма аргоновой дуги при TIG и TIG-F сварке является беспримесной. Пары флюса и плавящегося анода не проникают в столб дуги, а их свечение представляет собой полый конус на периферии аргоновой плазмы.

На основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований [2, 8, 14–19, 24–31] в работе [23] предложена теоретическая модель контракции дуги флюсом при TIG-F сварке. Модель описывает сжатие положительного столба дуги и ее анодного пятна как результат воздействия комплекса факторов. Это экранирование металла вокруг сварочной ванны жидким флюсом и стабилизация в ее пределах анодного пятна, повышение теплопроводности дугового газа, обусловленное процессами диссоциации и молекулярной диссоциации паров флюса, деионизация периферийных участков дуги в результате захвата электронов проводимости электроотрицательными частицами паров флюса и продуктов его взаимодействия со свариваемым металлом. Модель позволяет аналитически определить размеры электропроводящей области столба дуги. Естественно, что в зависимости от типа свариваемого металла и сос-

тава флюса степень воздействия каждого из указанных факторов на контракцию дуги может быть различной.

Причины изменения формы проплавления в случае применения флюсов менее изучены [8, 32]. Нет однозначного мнения относительно механизма влияния флюса на глубину провара. Некоторые исследователи считают, что сжатие дуги и повышение плотности энергии в анодном пятне способствуют увеличению проплавления, однако не приводят данных, поясняющих сам механизм этого увеличения. Другие же полагают, что основная причина глубокого проплавления заключается в изменении градиента поверхностного натяжения жидкого металла в сварочной ванне и, как следствие, изменении направления течения Марангони. Но влияние потока жидкого металла в сварочной ванне, вызванного градиентом поверхностного натяжения, на глубину проплавления экспериментально изучали только для поверхностно-активных элементов, содержащихся в основном металле. Таким образом, полученные результаты не относятся к флюсам для TIG-F сварки [8].

В работе [20] расчетным методом прогнозировали глубину провара при сварке TIG-F. При этом учитывали возможные причины влияния флюса на форму проплавления [6, 15, 33, 34]. Так, ссылаясь на работы [15, 34], предполагали, что уменьшение поверхностного натяжения расплавленного металла флюсом может привести (под действием давления дуги) к образованию большего углубления на поверхности сварочной ванны и соответственно к увеличению глубины шва.

Однако расчеты показали, что глубина проплавления, которая может быть получена за счет более низкого поверхностного натяжения жидкого металла (при прочих равных условиях), существенно меньше, чем глубина реальных швов, выполненных с применением флюса.

Таким образом, установлено, что изменение формы проплавления при TIG-F сварке не связано с возможным влиянием флюса на уровень поверхностного натяжения расплавленного металла в сварочной ванне. В то же время глубина проплавления значительно увеличивалась, если принимали, что флюс изменяет температурную зависимость поверхностного натяжения жидкого металла с падающей на возрастающую.

Как следует из статьи [33], в процессе сварки на поверхности сварочной ванны возникает градиент температуры, а следовательно, и градиент поверхностного натяжения, вызывающий конвективное течение Марангони. Жидкий металл течет по поверхности сварочной ванны от области с более низким к области с более высоким поверхностным натяжением. Если с увеличением температуры поверхностное натяжение уменьшается, что типично для чистых металлов, то течение направлено от центра сварочной ванны к ее периферии.

В этом же направлении происходит перенос тепла, что приводит к расширению шва и уменьшению его глубины. Если же с повышением температуры поверхностное натяжение возрастает (при наличии поверхностно-активных элементов),



то течение металла направлено от периферии сварочной ванны к ее центру. В том же направлении происходит эффективный перенос тепла, швы становятся более глубокими и узкими.

Градиент поверхностного натяжения возникает и в результате сегрегации примесей на поверхности сварочной ванны. Например, вследствие более интенсивного испарения поверхностно-активных элементов в самой горячей центральной части сварочной ванны поверхностное натяжение здесь будет возрастать, что приведет к появлению центростремительного потока Марангони. Это еще раз свидетельствует о том, что увеличение провара при сварке с флюсом не связано с уменьшением поверхностного натяжения расплавленного металла в сварочной ванне и образования в нем более глубокого кратера [15, 34].

Детально исследовав влияние поверхностно-активных элементов на форму швов, авторы работы [35] установили, что, например, селен способствует получению узких и глубоких швов на нержавеющей стали при TIG сварке и лазерной сварке, и подтвердили реальность модели проплавления за счет течений металла в сварочной ванне, обусловленных градиентами поверхностного натяжения. Однако при некоторых режимах сварки, например, при больших значениях сварочного тока доминирующими в механизме проплавления становятся другие факторы, в частности сила Лоренца. В работе [35] отмечается также отсутствие каких-либо данных о влиянии потоков жидкого металла при TIG сварке цветных металлов.

В предположении, что форма шва при TIG сварке определяется главным образом конвективными течениями в сварочной ванне, авторы работ [36, 37] рассмотрели возможные движущие силы этих течений. К ним относят аэродинамическое сопротивление, вызванное катодными потоками в дуге (силу трения), силу выталкивания, возникающую в связи с разной плотностью металла в ванне (плавучесть), электромагнитную силу Лоренца и градиент поверхностного натяжения жидкого металла. При этом сила трения и выталкивания во всех случаях направлены от центра ванны наружу, а сила Лоренца — от периферии к центру сварочной ванны.

Направление действия сил, вызванных градиентом поверхностного натяжения, зависит от наличия и концентрации поверхностно-активных примесей в металле и распределения температуры в сварочной ванне. Сила выталкивания, как правило, незначительна, ею пренебрегают и рассматривают баланс трех сил.

При обычной TIG сварке под действием катодного потока и эффекта Марангони конвекция в сварочной ванне имеет центростремительное направление, а теплота, поступающая от дуги, переносится на периферию сварочной ванны. В результате образуются широкие и неглубокие швы. Под действием же поверхностно-активных элементов, в частности кислорода, содержащегося во флюсах для сварки сталей, происходит изменение градиента поверхностного натяжения и, как следствие, направления течения Марангони. Оно подавляет центростремительную конвекцию от катодного потока. Тепло

дуги переносится в центр и вглубь сварочной ванны, увеличивается провар и уменьшается ширина шва. При сварке с использованием флюса следует также учитывать увеличение силы Лоренца [38] в результате повышения плотности тока на аноде, что также способствует углублению провара и уменьшению ширины швов.

Влияние давления дуги при TIG сварке на форму швов наиболее подробно рассмотрено в работе [38]. Во всех исследованиях, посвященных этому вопросу, речь идет не о давлении как таковом, а о силовом воздействии дуги на анод (свариваемый металл). Оно складывается из скоростного напора газового потока (газокинетические силы) и объемных электромагнитных сил, возникающих в проводнике при взаимодействии тока с собственным магнитным полем.

В сварочной дуге конической формы появляется продольная составляющая электромагнитной силы, направленная в сторону сварочной ванны. Такая же сила возникала и в самой ванне, вызывая в ней центростремительное движение жидкого металла. Эта сила (сила Лоренца) возрастает с увеличением сварочного тока и его плотности [39–41].

Принимая это во внимание, авторы работы [17] высказали предположение о том, что флюсы способствуют резкому увеличению силы Лоренца, возникновению направленного вглубь сварочной ванны потока жидкого металла и, следовательно, тепла, увеличению проплавления и уменьшению ширины швов.

Если флюс содержит поверхностно-активные (для свариваемого металла) элементы в достаточном количестве и температурная зависимость поверхностного натяжения жидкого металла возрастающая, возникает течение Марангони, направленное от периферии ванны к центру.

В этом случае потоки жидкого металла и тепла, обусловленные силой Лоренца и градиентом поверхностного натяжения, складываются, формируется глубокий и узкий шов. Если же в результате испарения в наиболее нагретом центральном участке ванны количество поверхностно-активных элементов будет меньше, чем на периферии, или в составе флюса вообще нет таких элементов, то направление течения Марангони изменится. В этом случае потоки жидкого металла и тепла, обусловленные силой Лоренца и градиентом поверхностного натяжения, имеют противоположные направления, а форма шва определяется разностью этих потоков.

Таким образом, высокая проплавливающая способность дуги при TIG-F сварке обусловлена ростом силы Лоренца в результате контракции дуги и увеличения плотности тока на аноде. Возможный переход поверхностно-активных элементов из флюса в сварочную ванну и их влияние на градиент поверхностного натяжения расплавленного металла не являются определяющими для формирования швов.

1. Гуревич С. М., Замков В. Н., Куширенко Н. А. Повышение эффективности проплавления титановых сплавов при аргоно-дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 1–5.



2. *Гуревич С. М., Замков В. Н.* Некоторые особенности сварки титана неплавящимся электродом с применением флюсов // Там же. — 1966. — № 12. — С. 13–16.
3. *Макара А. М., Кушниренко Б. Н., Замков В. Н.* Аргонодуговая сварка высокопрочных сталей мартенситного класса с применением флюса // Там же. — 1968. — № 7. — С. 73–74.
4. *Илюшенко В. М., Васильченко В. В., Седов В. Е.* Влияние некоторых фторидов на проплавление меди при аргонодуговой сварке // Там же. — 1981. — № 2. — С. 70–71.
5. *Сварка меди неплавящимся электродом с использованием флюсов-паст* / В. М. Илюшенко, В. В. Васильченко, В. Е. Седов и др. // Свароч. пр-во. — 1984. — № 4. — С. 27–28.
6. *Lucas W., Howse D.* Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes // *Welding & Metal Fabrication*. — 1996. — № 1. — P. 11–17.
7. *Paskell T., Lundin C., Castner H.* GTAW flux increases weld joint penetration // *Welding J.* — 1997. — № 4. — P. 57–62.
8. *Effect of flux on A-TIG of mild steels* / D. Fan, R. Zhang, Y. Gu, M. Ushio // *Transactions of JWRI*. — 2001. — **30**, № 1. — P. 35–40.
9. *Le soudage A-TIG de l'acier inoxydable superduplex UR52N* / R. Saidov, H. Mourtou, R. Le Gall, G. Saïndernan // *Soudage et Techniques Connexes*. — 1999. — Juil./Aout. — P. 4–8.
10. *Paton B. E., Zamkov V. N., Priloutsky V. P.* Le soudage A-TIG titane et de ses alliages // *Ibid.* — 1998. — Nov./Dec. — P. 23–26.
11. *Васильченко В. В., Седов В. Е.* Исследование особенностей применения фторидов при АДС меди // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. 2-й Всесоюз. конф. (Киев, 1985). — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 352–357.
12. *Adams A. E.* NJC flux reduces distortion on turbine engine housing for defense contractor // *Welding J.* — 2000. — № 1. — P. 92.
13. *Marya M.* Theoretical and experimental assessment of chloride effects in the A-TIG welding of magnesium. — S. 1., [2002]. — 15 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-594).
14. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Гуревич С. М.* Влияние состава флюса на процесс сварки титана неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1977. — № 4. — С. 22–26.
15. *Савицкий М. М., Лесков Г. И.* Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавливающую способность дуги с вольфрамовым катодом // Там же. — 1980. — № 9. — С. 17–22.
16. *Влияние активизирующих флюсов на строение сварочной дуги, горящей в аргоне* / Ю. В. Казаков, В. И. Столбов, К. Б. Корягин и др. // Свароч. пр-во. — 1985. — № 4. — С. 30–32.
17. *Влияние активизирующих флюсов на проплавливающую способность сварочной дуги и концентрацию энергии в анодном пятне* / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Там же. — 1977. — № 3. — С. 3–4.
18. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Распределение плотности тока в анодном пятне при дуговой сварке титана // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 19–22.
19. *Влияние флюсов на температуру и плотность тока в столбе дуги при аргонодуговой сварке титана вольфрамовым электродом* / Л. Е. Ерошенко, В. П. Прилуцкий, В. Ю. Белоус, В. Н. Замков // Автомат. сварка. — 2001. — № 6. — С. 3–6.
20. *Lowke J. J., Tanaka M., Ushio M.* Predictions of weld depth in TIG arcs from unified arc-electrode calculations. — S. 1., [2001]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-212-995).
21. *Oxide flux quantity and size effects on the penetration depth in A-TIG welding* / L. U. Shaping, F. Hidetoshi, T. Manabu, N. Kiyoshi // *Transactions of JWRI*. — 2002. — **31**, № 2. — P. 187–192.
22. *Прилуцкий В. П., Замков В. Н., Гуревич С. М.* Аргонодуговая сварка титановых сплавов с применением присадочной порошковой проволоки // Автомат. сварка. — 1975. — № 7. — С. 41–44.
23. *Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне* / Б. Е. Патон, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, П. В. Порицкий // Там же. — 2000. — № 1. — С. 3–9.
24. *Симоник А. Г., Петвиашвили В. И., Иванов А. А.* Эффект контракции дугового разряда при введении электроотрицательных элементов // Свароч. пр-во. — 1976. — № 3. — С. 49–51.
25. *Скворцов Е. А.* Влияние фторидов щелочных металлов на процессы в дуговой плазме при аргонодуговой сварке титановых сплавов // Там же. — 1998. — № 7. — С. 25–29.
26. *Исследование спектра дуговой плазмы при аргонодуговой сварке титана вольфрамовым электродом по флюсу* / Л. Е. Ерошенко, В. Н. Замков, В. С. Мечев, В. П. Прилуцкий // Автомат. сварка. — 1980. — № 9. — С. 23–25.
27. *А. с. 321069 СССР, МПК В 23 К 35/36.* Флюс для электродуговой сварки / В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, Б. Н. Кушниренко и др. — Опубл. 28.07.72; Бюл. № 23.
28. *Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н.* Изучение процессов в дуге при сварке титана неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1994. — № 4. — С. 3–5.
29. *Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н.* Исследование свечения вольфрамового катода в дуговом промежутке сварочной дуги в аргоне // Там же. — 1996. — № 5. — С. 8–12.
30. *Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н.* Исследование свечения паров анода в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса // Там же. — 1997. — № 11. — С. 11–13.
31. *Исследование свечения паров анода для оценки технологических характеристик дуги в аргоне* / Л. Е. Ерошенко, В. Н. Замков, В. С. Мечев, В. П. Прилуцкий // Там же. — 1979. — № 9. — С. 33–35.
32. *Anderson P. C. J., Wictorovich R.* Improving productivity with A-TIG welding // *Welding & Metal Fabrication*. — 1996. — March. — P. 108–109.
33. *Heiple C. R., Roper J. R.* Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry // *Welding J.* — 1982. — № 4. — P. 97–102.
34. *Савицкий М. М., Кушниренко Б. Н., Олейник О. И.* Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активизирующими флюсами (АТИГ-процесс) // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 20–28.
35. *Surface active element effects on the shape of GTA, laser, and electron beam welds* / C. R. Heiple, J. R. Roper, R. T. Stagner, R. J. Aden // *Welding J.* — 1983. — № 3. — P. 72–77.
36. *Tanaka M.* Effects of activating flux on weld penetration in TIG welding process // *J. JWS*. — 2002. — **71**, № 2. — P. 25–33.
37. *Modenesi P. J., Apolinario E. R.* Estudo da Soldagem A-TIG com Fluxos de um Componente // *Soldagem & Inspecao-ano 5*. — 1999. — № 9. — P. 9–16.
38. *Ishizaki K.* A new approach to the mechanism of penetration // *Weld pool chemistry and metallurgy: Intern. conf. (London, 1980, 15–17 Apr.)*. — Cambridge, 1980. — P. 65–76.
39. *Savage W. F., Nippes E. F., Agusa K.* Effect of arc force on defect formation in GTA welding // *Welding J.* — 1979. — № 7. — P. 212–224.
40. *Ерохин А. А.* Силовое воздействие дуги на расплавляемый металл // Автомат. сварка. — 1979. — № 7. — С. 21–26.
41. *Burleigh T. D., Eagar T. W.* Measurement of the force exerted by a welding arc // *Metallurg. Trans. A*. — 1983. — June. — **14(6)**. — P. 1223–1224.

Results of investigations of effect of fluxes on the process of arc welding with tungsten electrode in argon are considered. A special attention was paid to the analysis of causes which increase the technological characteristics of arc by flux, in particular the increase in penetration depth. It is supposed that the latter is stipulated by a growth in Lorentz force due to arc contraction by flux and increase in current density in the anode region. Effect of change in gradient of surface tension of molten metal in weld pool on penetration is of a secondary importance.

Поступила в редакцию 11.06.2004