ISSN 0005-111X

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА

www.patonpublishinghouse.com

СВАРКА ♦ РЕЗКА ♦ НАПЛАВКА ♦ ПАЙКА ♦ НАНЕСЕНИЕ ♦ ПОКРЫТИЙ

Издается с 1948 года

МАРТ 2016

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

УДК 621.791.927.54

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДУГОВОЙ СВАРКИ (НАПЛАВКИ) ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Ш. ЭГЕРЛАНД, Й. ЦИММЕР, Р. БРУНМАЙЕР, Р. НУССБАУМЕР, Г. ПОШ, Б. РУТЦИНГЕР
Fronius International GmbH, Wels, Austria. E-mail:egerland.stephan@fronius.com

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде защитных газов (GTAW) — процесс, который известен тем, что он обеспечивает наивысшее качество сварки, хотя и имеет более низкие характеристики производительности. К дуговой сварке в защитных газах (GMAW) часто прибегают с целью повышения производительности с обеспечением качества, соответствующего общепринятым стандартам. В секторах промышленности, где требуется выполнение высококачественной, например, коррозионностойкой наплавки с применением присадочных материалов на никелевой основе, жестко соблюдается необходимость удовлетворения критерия «нулевого дефекта». В этой связи ограниченная производительность преодолевается использованием передовых систем GTAW с «горячей» проволокой. В настоящей статье, с позиций автоматизации сварки, описывается состояние технологий в этой области включая устройства и их применения, а именно процесс сварки (наплавки) GTAW со сдвоенным катодом и «горячей» проволокой, что значительно расширяет достигаемые пределы производительности. Библиогр. 27, табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: сварка (наплавка) GTAW, одиночный катод, сдвоенный катод, «горячая проволока», производительность сварки, нулевая дефектность, разбавление металла

Введение. Термин дуговая сварка в его самом широком смысле предполагается использовать для обозначения сварки плавлением. Употребляют его также совместно с термином наплавка. В этом случае она подразделяется на наплавку твердосплавную и коррозионностойкую [1, 2]. По экономическим соображениям производители наиболее часто прибегают к таким высокоэффективным процессам наплавки, как дуговая под флюсом (SAW) или электрошлаковая наплавка. Несмотря на достижение при этом высокого качества, соответствующего общепринятым стандартам, эти процессы в ряде случаев ограниченно применимы, например, из-за невозможности применения флюса при наплавке в неудобном положении, либо высокого разбавления наплавляемого металла основным, или разбавления в нежелательных пропорциях.

Процессы дуговой сварки в защитных газах GMAW с контролем дуги (например, процесс CMT), были внедрены в промышленность, чтобы решить проблемы, связанные, например, с коррозией [3] и, таким образом, частично заменить SAW и электрошлаковую наплавку. В наплавке существует, кроме того, определение критерия «нулевого дефекта», который является первоочередным, позволяя избегать сложной повторной обработки, гарантирует стабильную эффективность наплавки и обеспечение длительного срока эксплуатации изделий. Поэтому, несмотря на ограниченные характеристики эффективности дуги и скорости наплавки, дуговая сварка (наплавка) вольфрамовым электродом в среде защитных газов (GTAW) часто применяется в подобных случаях. Чтобы преодолеть недостаточную производительность этого процесса, были разработаны системы, модифицирующие процесс подачи проволоки и позволяющие применять способ GTAW либо с «холодной», либо с «горячей» проволокой. В то время, как первый из них вначале демонстрировал неустойчивость и довольно сложную адаптацию [4, 5], второй оказался способным преодолевать недостатки, в основном, за счет предварительного подогрева проволоки.

Ранее А. Манс [6] описал такие преимущества процесса, как к примеру, значительное увеличение скорости наплавки благодаря нагреву проволоки проходящим током (I^2R) и, по сравнению с GTAW (с «холодной» проволокой), возможность повышения скорости подачи проволоки в сварочную ванну в 3...10 раз [4]. Системы сварки GTAW с «горячей» проволокой постоянно совершенствуются и в настоящее время имеют хорошую репутацию благодаря ряду преимуществ у потребителей [2, 7, 8]. Информация о соотношении рабочих характеристик GTAW с «горячей» и «холодной» проволоками отмечена в работе [6], и, в соответствии с этими данными, определенная настройка параметров может даже позволить расплавлять проволоку без всякой дополнительной дуги. Это объясняется электрическим нагревом проволоки определенного состава проходящим током с уче-

© Ш. Эгерланд, Й. Циммер, Р. Брунмайер, Р. Нуссбаумер, Г. Пош, Б. Рутцингер, 2016

том ее электрического сопротивления и диаметра в соответствии с уравнением [6]:

$$I^2R = I^2L\rho/d^2(\pi/4), \quad (1)$$

где ρ — сопротивление материала проволоки; L — эффективная длина вылета проволоки; d — диаметр проволоки. Энергия, необходимая для расплава проволоки, может быть выражена уравнением:

$$E_{плав.} = HF\delta d^2(\pi/4), \quad (2)$$

где H — теплосодержание объема расплавленной проволоки; F — скорость подачи проволоки; δ — плотность проволоки.

На рис. 1, составленном согласно работе [6], схематически изображен принцип GTAW с «горячей» проволокой.

Скорость подачи проволоки F может быть выражена уравнением:

$$F = I^2L(ES)/(\pi d^2/4). \quad (3)$$

ES в данном случае обозначает «константу чувствительности вылета» [6], которая зависит только от химического состава материала проволоки. Соответственно, рассчитать длину вылета проволоки L можно по уравнению:

$$L = F(\pi d^2/4)^2/I^2(ES) \quad (4)$$

ES может быть получено из уравнения:

$$ES = \rho/H\delta. \quad (5)$$

Реальное сопротивление ρ представляет разницу между сопротивлением материала при температуре плавления и окружающей температуре и может быть аппроксимировано в виде уравнения:

$$\rho = \rho_{плав.} - \rho_{окр.}/ln(\rho_{плав.}/\rho_{окр.}). \quad (6)$$

По аналогии плотность материала проволоки δ может быть получена из уравнения:

$$\delta = \delta_{плав.} - \delta_{окр.}/\ln(\delta_{плав.}/\delta_{окр.}). \quad (7)$$

Согласно работе [6] величина ES пропорциональна значению I^2R. Таким образом, проволоки с более высоким сопротивлением обеспечивают более высокую скорость наплавки по сравнению с электродной проволокой с более низким сопротивлением.

За счет механизированной подачи «холодной» проволоки GTAW обеспечивает относительно высокую скорость наплавки. Часто это сопровождается неустойчивостью подачи электродной проволоки в сварочную ванну, что, в свою очередь, может привести к неравномерному плавлению ее. Наблюдается «захолаживание» ванны, ухудшающее стабильность процесса и качество шва, независимо от того, подается ли проволока в ванну расплава со стороны передней или задней кромки. Дуга необходима для расплава как основного, так и присадочного материала, поэтому при «захолаживании» увеличивается риск получения неравномерно наплавленных валиков.

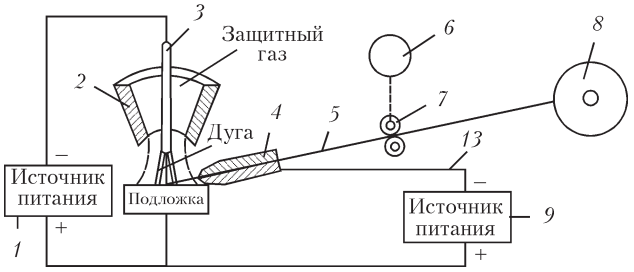

Рис. 1. Схематическое изображение системы GTAW с горячей проволокой [6]: *1* — источник питания GTAW (режим постоянного тока СС); *2* — сопло подачи защитного газа; *3* — вольфрамовый электрод; *4* — контактная трубка; *5* — присадочная проволока; *6* — двигатель подачи проволоки; *7* — подающие валки; *8* — катушка с проволокой; *9* — источник подачи горячей проволоки (режим постоянного напряжения CV)

Предварительным нагревом электрода при GTAW с «горячей» проволокой устраняется необходимость потребления значительной части мощности тока дуги. Сохраняя соответствующий угол для вхождения в сварочную ванну ($0° \le 30° \le 60°$) [4] проволока может быть удобно расположена со стороны задней кромки, близко, но не напрямую, взаимодействуя с дугой [5].

Более современные разработки исключают второй источник питания за счет введения двух электронных схем управления током. Первая из них обеспечивает постоянные характеристики напряжения для нагрева присадочной проволоки, а вторая схема обеспечивает постоянные характеристики выходного тока для управления током дуги [8]. Несмотря на заявление о значительном сокращении количества оборудования, обычно необходимого для выполнения GTAW с «горячей» проволокой, авторы по-прежнему не знают примеров, значительного применения таких систем в промышленности. Особенно это касается наплавки, которая могла бы представлять процесс GTAW с «холодной» проволокой, обеспечивающий пони-

Таблица 1. Предварительные данные экспериментов

Вид процесса	$I_{имп}$, А	$I_{св}$, А	$I_{фон}$, А	$U_{ср}$, В	$v_{п.пр}$, см/мин	$v_{п.гор}$, см/мин	$t_{имп}$, мс	$t_{ср}$, мс	f, Гц	$I_{гор.пр}$, А
С одиночным катодом со спаренной «горячей» проволокой	320	–	280	13,5	1,6*	32	200	200	2,5	70
То же	350	–	300	14,2	2,6*	50	150	150	3,3	70
Со сдвоенным катодом с одиночной «горячей» проволокой	–	450*	–	12,1	7,6	80	–	–	–	190
* Данные являются суммарными, т.е. следует уменьшать вдвое.										

женные глубину проплавления и степень разбавления с поддержанием стабильности процесса.

С. Голдсберри в работе [9] предполагает, что технология сварки с «горячей» проволокой в целом нашла лишь ограниченное применение в промышленности со времени изобретения ее в 1960-х годах. Поэтому, конкретные исследования проводились главным образом, чтобы понять явления, связанные с повышением производительности, например, за счет внедрения в процесс двух проволок с индукционным нагревом и успешным электромагнитным управлением увеличенным объемом сварочной ванны при сварке плавлением в неудобном положении [10]. Для К. Хори и др. [11], изучавших явления магнитно дутья дуги, хорошо известна главная проблема в использовании технологии GTAW с «горячей» проволокой. Авторы, которые разработали систему для применения высокочастотного (50...150 Гц) импульсного тока для предварительного нагрева проволоки, смогли преодолеть нестабильность («искрение дуги»), вызванную электромагнитными полями, индуцированными вольфрамовой дугой в защитных газах и действующими на проволоку, как только она отделяется от изделия. С. Уегури и др. [12] попытались оценить оптимальное соотношение между величиной сварочного тока и скоростью плавления, используя часть мощности дуги для предварительного нагрева проволоки. Было обнаружено, что увеличение скорости перемещения горелки в основном допустимо при увеличении ширины сварочной ванны и, что величина сварочного тока ограничивает скорость подачи проволоки, и что наблюдается почти линейная зависимость между скоростью перемещения и током нагрева проволоки. Также для сварки плавлением М. Ямамото и др. [13] разработали «сверхвысокую скорость» процесса GTAW с «горячей» проволокой. Для достижения высокой скорости перемещения и приемлемого качества было установлено, что температура предварительного нагрева проволоки является наиболее важным параметром. Непосредственно основываясь на работе [13], К. Шинозаки и др. [14] тщательно изучили явления, вызванные как температурой проволоки, так и тепловложением дуги. Авторы пришли к выводу, что плавление присадочной проволоки зависит, в основном, от температуры предварительного нагрева проволоки, а плавление основного материала, в основном, определяется сварочной дугой.

Автоматизация наплавки GTAW с «горячей» проволокой. Автоматизация сварки способствует повышению ее характеристик и производительности даже при использовании процесса наплавки GTAW с одиночной «горячей» проволокой. Новейшее оборудование (рис. 2), может быть использовано, например, для наплавки внутренних или внешних поверхностей изделий.

Две электрически изолированные проволоки, подаваемые раздельно в ванну, получаемую одним вольфрамовым электродом, успешно повышают производительность процесса наплавки. Для применения в промышленности были разработаны соответствующие сварочные горелки при-

Рис. 2. Системы наплавки GTAW с непрерывным вращением горелки ETR® внутренних или внешних поверхностей изделий

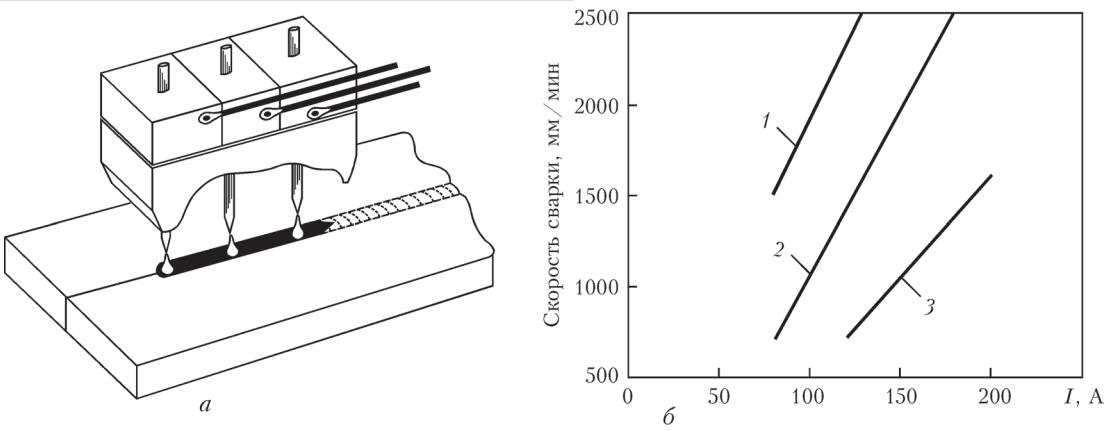

Рис. 3. Схематическое изображение GTAW с несколькими катодами (*а*) и сравнение скорости наплавки (*б*); *1* — три катода; *2* — два катода; *3* — один электрод (катод). Наплавка проводилась с полным проплавлением проволокой из нержавеющей стали AISI 304 диаметром 1,2 мм (по Дж. Нориш [21])

менительно к автоматизированной аргонодуговой наплавке с «горячей» проволокой внутренних или внешних поверхностей. При этом преодолеваются недостатки использования одной «горячей» проволоки [2]. Такое оборудование позволяет производить экономичную наплавку толстостенных изделий, одновременно отвечая самым высоким требованиям к качеству, т.е. критерию «нулевого дефекта», а также обеспечивая низкие коэффициенты разбавления.

GTAW с несколькими катодами. Повышение производительности GTAW или скорости наплавки обычно связано с увеличением сварочного тока, увеличением силы дуги или давления дуги [15, 16]. Последнее склонно вызывать дефекты сварки, такие как подрезы или усиление валика [17]. Чтобы предотвратить эти дефекты М. Ямада в конце 1990-х годов [18] разработал и запатентовал [19] новаторский высокоэффективный метод GTAW. Оба электрода, независимо приводимые в действие двумя источниками питания и электрически изолированные друг от друга, были сведены в одну сварочную горелку. Подача «горячей» проволоки в ванну позволила увеличить производительность наплавки, например, ее скорость при изготовлении больших резервуаров из 9 %-й никелевой стали [20]. Геометрия электродов и их настройка описаны среди других особенностей этого способа. GTAW с несколькими катодами (рис. 3, *а*) вначале прошла испытание с целью повышения как производительности процесса, так и качества шва.

Дж. Нориш [21] отмечает, что при GTAW с несколькими катодами можно значительно увеличить скорость перемещения дуги, удлиняя ванну шва и предотвращая такие дефекты сварки, как подрезы. Графики зависимости скорости перемещения от тока приведены на рис. 3, *б* при применении GTAW с одиночным и несколькими катодами. Значительные различия становятся заметными при увеличении числа катодов. Нежелательное, но возможное отклонение дуги между электродами можно преодолевать, например, за счет использования высокочастотных импульсов или магнитной стабилизации дуги [21].

GTAW со спаренным катодом. Г. Чжан и др. в работе [22] изучали физические явления сварки TIG со спаренным вольфрамовым электродом, т.е. GTAW с применением двух электродов в одной сварочной горелке. Авторы предположили, что сила Лоренца, притягивающая обе дуги, образует таким образом единую дугу, градиент давления которой значительно ниже по сравнению с процессом GTAW с одним электродом.

Сила притяжения F может быть рассчитана следующим образом [22]:

$$F = k\frac{I_1 I_2}{L}, \qquad (8)$$

где k — константа; I_1, I_2 — сварочный ток для катода 1 и катода 2; L — расстояние между двумя электродами. Авторы считают, что F возрастает при увеличении тока I и снижается при увеличении расстояния L. Была предпринята попытка оценить эти соотношения и, особенно, влияние этого явления на давление дуги. Было обнаружено, что последнее уменьшается при GTAW со спаренным катодом из-за более широкой области, которую охватывает сдвоенная дуга, приближающаяся к эллиптическому поперечному сечению.

На рис. 4, *а* на основе работы [23] показано давление дуги для сварки с одиночным катодом, которое круто растет в центре дуги при увеличении токов. На рис. 4, *б* опять же изображено давление дуги для GTAW со спаренным катодом, которое меняется по пологой кривой и более широко распределяется вокруг притягивающихся дуг.

В целом, наплавка требует низких уровней разбавления наплавленного металла с основным для поддержания свойств наплавленного металла, например, коррозионной стойкости. Усадку металла шва также считают функцией увеличения сварочного тока [16]. С. Лен и его коллеги в работах

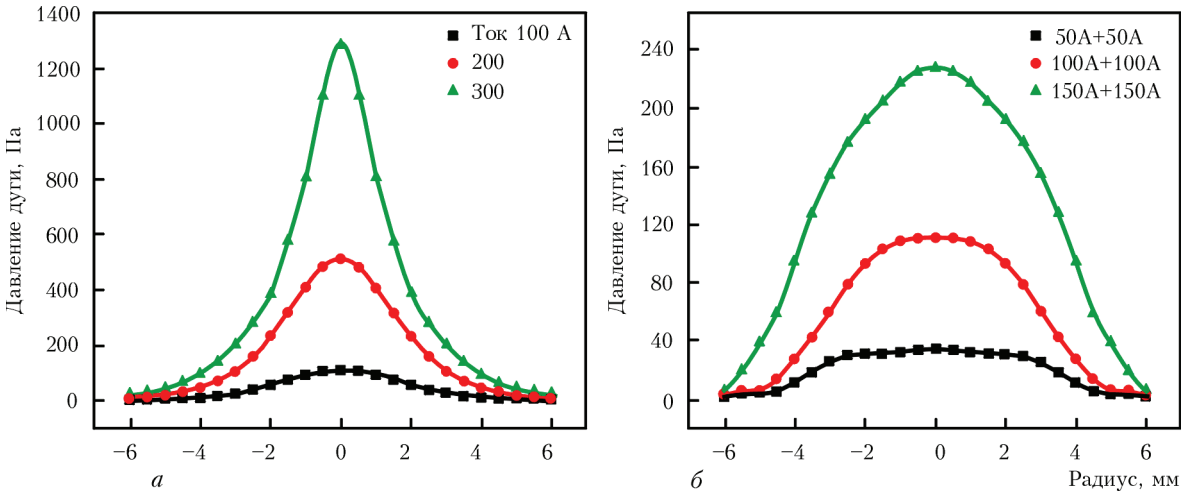

Рис. 4. Давление дуги, измеренное для GTAW с одиночным (*а*), сдвоенным (*б*) катодами [23]

[22, 23], тщательно изучили соотношения между увеличением тока и его влиянием на распределение давления дуги при GTAW со сдвоенным катодом. Они обнаружили, что давление снижается по сравнению с аналогичными значениям тока при сварке с одиночным катодом.

Принимая значение основной силы дуги, возникающей из плазменной струи и направленной на поверхность анода, согласно работе [23], давление дуги может быть рассчитано по закону сохранения импульса:

$$P = \frac{I}{2}\xi v^2, \qquad (9)$$

где P — давление дуги; ξ — плотность плазмы; v — ее скорость.

Используя подход Х. Мекер [24] к соотношению максимальной скорости v_c и максимальной плотности тока, находящейся в центре дуги, и принимая поток плазмы как несжимаемый и невязкий:

$$v_c = \sqrt{\frac{u_0 Ij}{2\pi\xi}}, \qquad (10)$$

где u_0 — магнитная проницаемость свободного пространства, а j обозначает плотность тока, можно окончательно достичь соотношения между давлением дуги P_c и j в центральной линии дуги [24]:

$$P_c = \frac{u_0 Ij}{4\pi}, \qquad (11)$$

представляя давление дуги как значение, прямо пропорциональное току I или плотности тока j соответственно.

Применяя выражение (8), определяющее силу, которая притягивает дуги в сторону центра, можно увидеть увеличение давления дуги в центре с увеличением токов дуги или уменьшением расстояния между двумя рабочими катодами. Однако из-за разделенных катодов обе дуги смещаются от центра, аналогичным образом смещая и максимумы давления. Согласно работе [23] сила притяжения производит перекрытие дуги, однако, получаемые пиковые значения давления находятся вне центра и, следовательно, достигнутое давление «сдвоенной дуги» падает по сравнению с давлением каждой отдельной дуги или «перекрытой дуги».

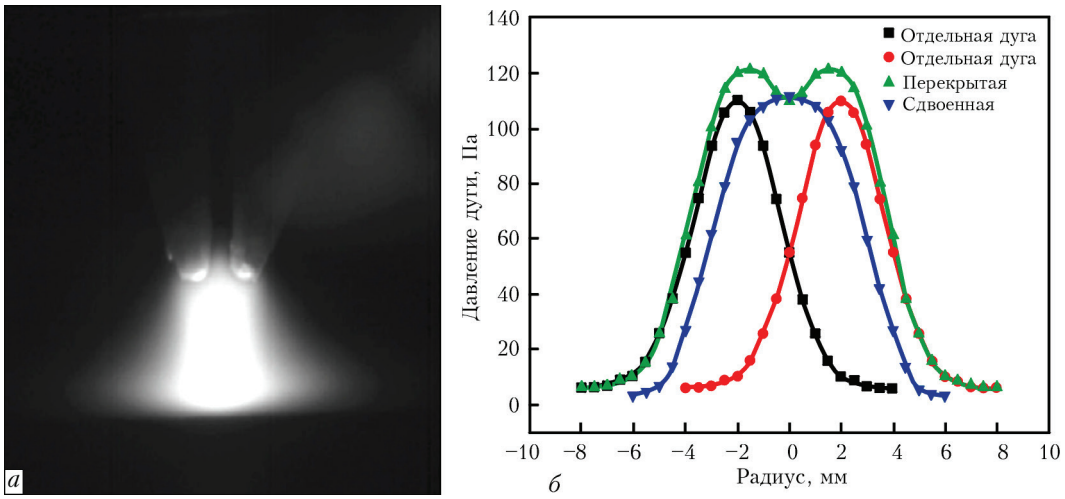

Рис. 5. Видимое перекрытие дуг 2×100 А (*а*) и сравнение давлений отдельной, перекрытой, и сдвоенной дуги (*б*) для 2×100 А тока дуги [23]

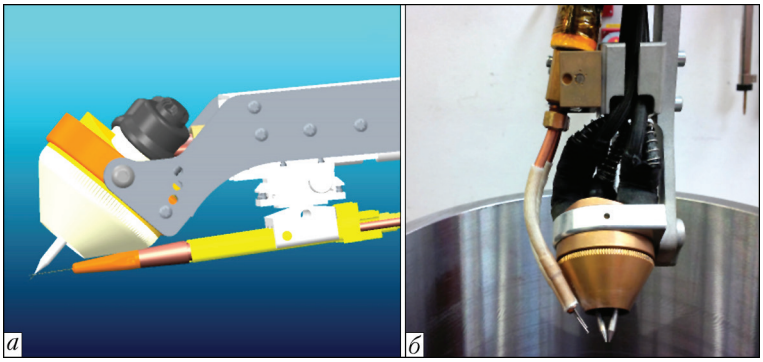

Рис. 6. Схематическое изображение сварочной горелки с одиночной (*а*) и спаренной «горячей» проволокой со сдвоенным катодом (FRONIUS SpeedClad®) (*б*)

На рис. 5, *а* показан видимый внешний вид настройки дуги сдвоенного катода при суммарном токе 200 А, а на рис. 5, б графически изображено сравнение давлений дуг.

В более поздней работе Г. Чжан и др. [25] применили метод Фаулера–Милна для определения профилей распределения температуры GTAW со сдвоенным катодом, включая влияние тока, длину дуги и пространственное расстояние электрода. Температурные максимумы были обнаружены в центре между двумя катодами, а ток оценивался при повышении температуры. Длина дуги почти не влияла на пиковую температуру, но, учитывая экспериментальные параметры настройки, распределение температуры на анодах было расширено. Более широкий зазор катода был оценен при снижении температуры в центре дуги. Е. Мартинс [26] разработал сварочную горелку со сдвоенным катодом для изучения полезного эффекта с целью предотвращения таких дефектов, как бугристость и подрезы валика, с обеспечением одновременно высокой производительности процесса.

Обоснование. Как было указано выше, сварочный ток играет важную роль при повышении производительности процесса. Основываясь на положительном эффекте GTAW со сдвоенным катодом в предотвращении дефектов сварки при более высоких значениях тока, исследователи сосредоточились на разработке автоматизации системы наплавки GTAW по технологии со сдвоенным вольфрамовым катодом.

Разработка сварочной горелки со сдвоенным катодом. Между двумя электродами может происходить сильная интерференция дуги, которая в конечном счете способна привести к прерыванию процесса из-за повреждения катода [26]. Одним из наиболее существенных технических требований для GTAW со сдвоенным катодом является очень точная и осуществимая в промышленных условиях регулировка двух вольфрамовых катодов в одной горелке. Устойчивое подавление взаимодействия дуг между двумя катодами должно быть обеспечено и для такого продолжительного автоматизированного процесса, как наплавка GTAW. Наконец, в качестве еще одной важной цели рассматривалась разработка комплектующих, легко приспосабливаемых для доступного на данный момент автоматизированного оборудования, как система наплавки GTAW ETR®.

На рис. 6 схематически изображен разработанный новаторский тип головки сварочной горелки со сдвоенным катодом, традиционно используемый для полностью механизированной GTAW с одиночной «горячей» проволокой (*а*) или, возможно, со спаренной «горячей» проволокой (*б*). Последний вариант применяется для дальнейшего увеличения скорости наплавки при увеличении скорости перемещения.

Конфигурация системы. Правильно собранная система должна обеспечить выполнение наплавки с одиночной и спаренной «горячей» проволокой. На рис. 7, *а* схематически изображена конфигурация для выполнения первого процесса, а на рис. 7, *б* — последнего.

Соответствующие параметры режима процесса и его стабильности взаимодействуют через интерфейс локальной высокоскоростной шины (LHSB), позволяя применять как чистые значения постоянного тока, так и накладывать и синхронизировать

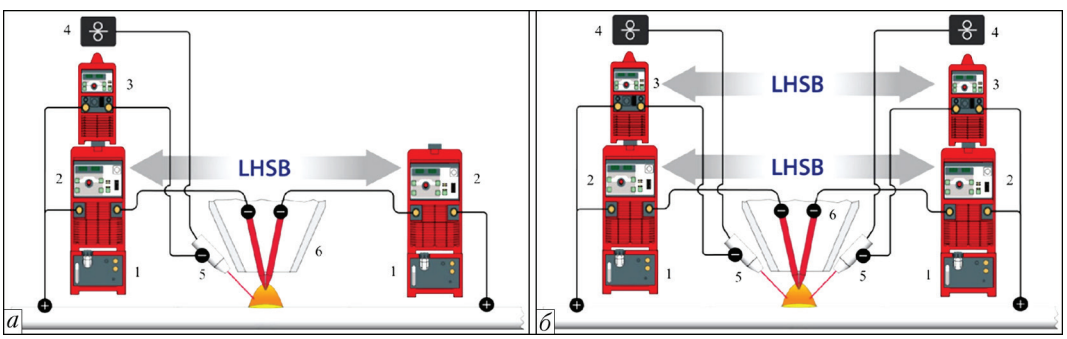

Рис. 7. Схематическое изображение конфигурации системы наплавки (SpeedClad®) со сдвоенным катодом с одиночной «горячей» проволокой (*а*) и конфигурация системы наплавки GTAW со спаренной «горячей» проволокой (*б*) (SpeedClad®); *1* — «охладитель»; *2* — инверторный источник питания GTAW; *3* — инверторный источник питания для подачи «горячей» проволоки; *4* — механизм подачи проволоки; 5 – контактная трубка с «горячей» проволокой; 6 – горелка со сдвоенным катодом

ток и движение подачи проволоки. И то и другое имеет решающее значение при плавных циклах запуска/остановки системы. Рабочая конфигурация оборудования, оснащенная системой ETR® с колонной и стрелой, имеет внешний вид, схематически показанный на рис. 8. Рисунок также показывает наложенный системный контроллер, позволяющий производить сложные определения траекторий сварки, которых следует придерживаться в зависимости от конкретной части детали.

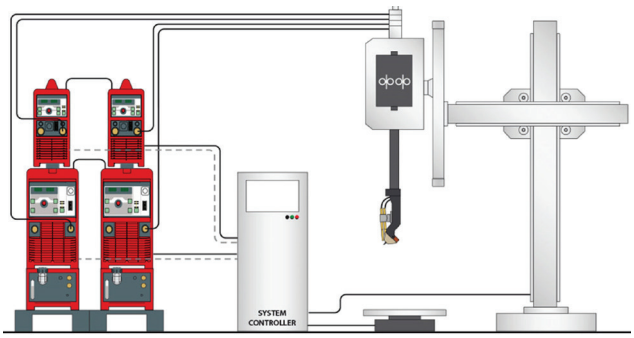

Рис. 8. Схематическое изображение системы наплавки GTAW со сдвоенным катодом (SpeedClad®)

Экспериментальная часть. Учитывая инновационный процесс наплавки GTAW со сдвоенным катодом и имеющееся оборудование, была предпринята попытка количественного определения различий и, по возможности, оценки технологических преимуществ других вариантов процесса наплавки. Следует отметить, что определенный экспериментальный подход был первоначально предпринят для получения предварительных результатов. То есть, наплавка с одиночным и со сдвоенным катодом как с одиночной, так и спаренной проволоками, проводилась в самом простом нижнем положении — «PA» (AWS ‘1F’). Затем экспериментальные условия (например, положение сварки) были ощутимо усложнены для тестирования новаторского процесса GTAW со сдвоенным катодом. В последствии экспериментальные условия для процесса наплавки GTAW со сдвоенным катодом были ужесточены, чтобы таким образом доказать его применимость в привычной производственной среде. Результаты прошли сравнение друг с другом, а количественные различия были обобщены.

Наплавка GTAW с одиночным катодом со спаренной «горячей» проволокой. Сварные образцы подложки были изготовлены из низкоуглеродистого основного металла марки S235 JR (в соответствии с Европейским стандартом EN 10025) толщиной 50 мм. Перед сваркой поверхность была механически обработана и очищена этиловым спиртом без предварительного нагрева. Применялись традиционные промышленные системы и компоненты фирмы FRONIUS, т.е. в качестве источников питания были использованы инвертор

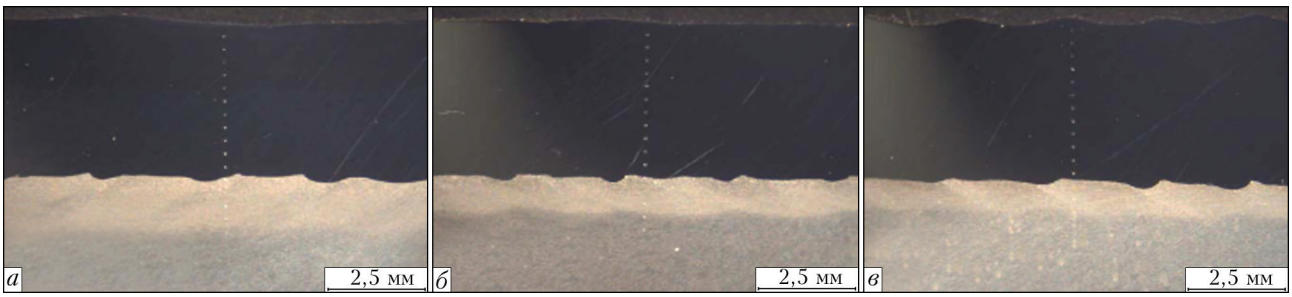

Рис. 9. Макрошлифы наплавки с одиночным катодом и спаренной «горячей» проволокой при скорости перемещения 32 (*а*), 50 (*б*) и со сдвоенным катодом и одиночной «горячей» проволокой 80 см·мин$^{-1}$ (*в*)

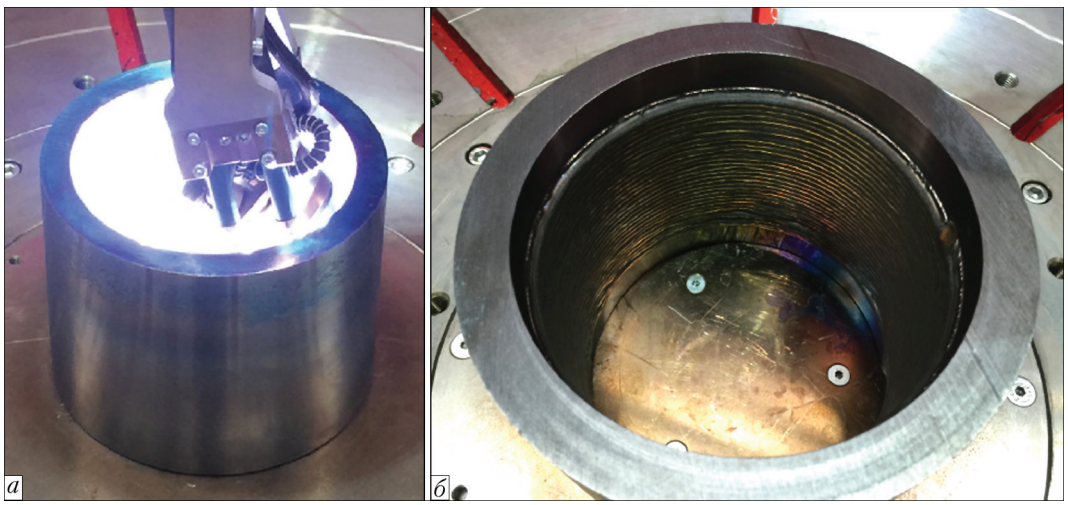

Рис. 10. Головка со сдвоенным катодом (SpeedClad®) во время процесса наплавки (*а*) и слои наплавленные импульсным процессом (*б*)

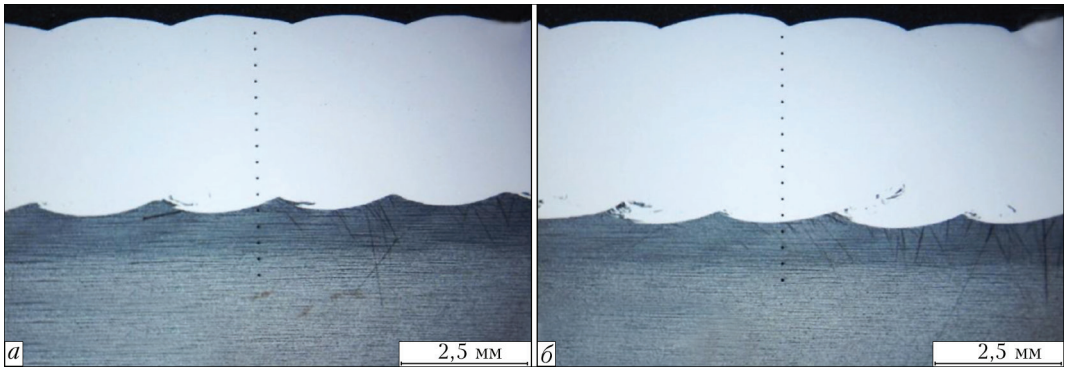

Рис. 11. Макрошлиф образца, наплавленного сдвоенным катодом и спаренной «горячей» проволокой на постоянном токе (*а*) и пульсирующем токе (*б*) при скорости перемещения 120 см/мин и положении сварки «РС»

переменного/постоянного тока GTAW «Magic Wave 5000» (на ток до 500 А при рабочем цикле 40 %), а для наплавки «горячей» проволокой — инвертор GTAW «TransTig 2200 JOB» (на ток до 220 А при рабочем цикле 40 %). Шестиосевой шарнирный робот KUKA был оснащен шланговым пакетом длиной 4,5 м + сварочной горелкой с водяным охлаждением «TTW 4500» и наложенным системным блоком управления «HMI-T10CC» соответственно для обеспечения движения и контроля дуги. В качестве защитного газа применялся аргон (чистота 99,996 %) с расходом 12 л/мин, вольфрамовый электрод (W + + 2 % оксида церия) диаметром 3,2 мм, заточенного под углом 60°. В двух сериях экспериментов применялась присадочная проволока диаметром 1,2 мм на основе никелевого сплава UNS N06625 (AWS ER NiCrMo-3) «Boehler Nibas 625-IG». Удельная плотность присадочного металла составляла 8,44 г/см^3 [27].

Все процессы, т.е. наплавка с одиночным катодом с «холодной» и «горячей» проволоками, а также со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой, проводились в два слоя и были ориентированы на среднюю толщину слоя примерно 2,5 мм. В соответствии с промышленными требованиями качество металла второго наплавленного слоя оценивалось по содержанию железа в нем на определенном расстояния от поверхности. То есть, для соответствия требованиям следовало постоянно придерживаться условия, при котором концентрация железа на глубине ≤ 3,0 мм от уровня поверхности составляла ≤ 55 %.

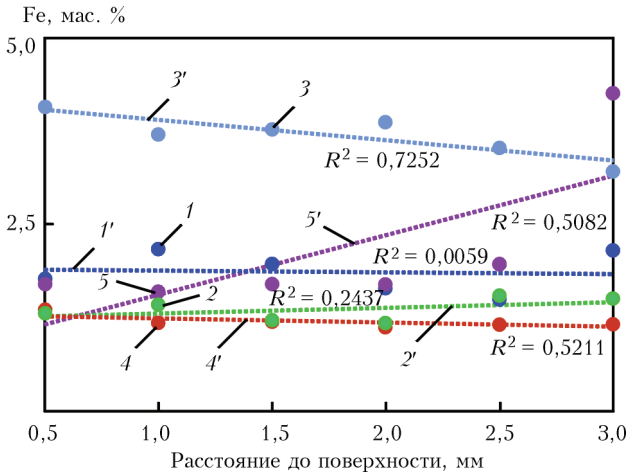

Рис. 12. Зависимость содержания железа (для применяемого процесса) от расстояния ниже наплавленного поверхностного слоя: *1*, *1′* — один катод, сдвоенная «горячая» проволока, 32 см/мин; *2*, *2′* — два катода, одна «горячая» проволока, 80 см/мин; *3*, *3′* — два катода, сдвоенная «горячая» проволока, импульсный постоянный ток, 120 см/мин; *4*, *4′* — один катод, сдвоенная «горячая» проволока, 50 см/мин; *5*, *5′* — два катода, сдвоенная «горячая» проволока, постоянный ток, 120 см/мин

Наплавка GTAW с одиночным катодом со спаренной «горячей» проволокой и со сдвоенным катодом с одиночной «горячей» проволокой. В табл. 1 указаны данные предварительно проведенных сварочных экспериментов с использованием импульсного, а также постоянного сварочного тока прямой полярности.

Наплавка GTAW со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой. Применялась промышленная технология наплавки GTAW фирмы FRONIUS ETR® (рис. 8), включающая систему, оснащенную колонной и стрелой «FCB 3000-3000/ML 700», спаренную с системой поперечного скольжения «FCS 200-1000/ML 375» с новаторской «TTHW 6000 M SpeedClad®» системой GTAW с горелкой со спаренной «горячей» проволокой. Система была завершена сборкой двух источников питания постоянного тока «Transtig 5000 JOB» (на токи до 500 А при рабочем цикле 40 %) и двух источников питания для подачи двух «горячих» проволок «Transtig 2200 JOB», а также интегрированным системным блоком управления Fronius «FPA 9000».

Сварные трубчатые образцы диаметром 155 мм и толщиной стенки 20 мм для имитации наплавки внутренней поверхности трубы были изготовлены из низкоуглеродистого основного металла марки S 235 JR. Всего было наплавлено 30 валиков в горизонтальном положении сварки «РС» (AWS ‘2F’). Перед сваркой поверхность образца была подвергнута механической обработке и очистке этиловым спиртом. Сварочные материалы использовались аналогичные тем, что и при наплавке

Таблица 2. Данные экспериментов с применением наплавки со сдвоенным катодом (FRONIUS SpeedClad®) со спаренной «горячей» проволокой

Вид тока	$I_{св}$, А	$I_{фон}$, А	U, В	$v_{п.пр}$, см/мин	$v_{п.гор}$, см/мин	$t_{п}$, мс	$t_{фон}$, мс	f, Гц	$I_{гор.пр}$, А
Непрерывный постоянный ток	370	–	10,4	4,8	120	–	–	–	240
Пульсирующий постоянный ток	430	370	11,0	5,0	120	70	70	7,1	250

GTAW с одиночным катодом с «горячей» проволокой, т.е. присадочная проволока диаметром 1,2 мм UNS N06625 и аргон в качестве защитного газа (чистота 99,996 %). Применялось цифровое управление расходом газа 24 л/мин и вольфрамовый электрод диаметром 4,0 мм, заточенный под углом 56°. Была выполнена кольцевая наплавка с получением 3,4 мм вертикального торцевого прироста, а вылет электрода поддерживался постоянным путем регулярного контроля напряжения дуги (AVC), который входил в состав системы ETR®. Осуществлялся ручной предварительный нагрев деталей до 200 °С при помощи кислородной горелки ($C_3H_8 + O_2$). Температура металла была выбрана 200 °С. В табл. 2 приведены основные параметры процесса наплавки со сдвоенным катодом и спаренной «горячей» проволокой.

Из табл. 2 видно, что оба соотношения скорости подачи «горячей» проволоки и тока «горячей» проволоки и скорости перемещения поддерживались постоянными на протяжении двух серий экспериментов. При импульсной сварке соотношение между импульсным и фоновым циклом определяет значение выходного тока. При уравновешивании между временем фонового и импульсного тока и учете выбранных параметров, импульсный процесс показывает значения сварочного тока немного выше среднего.

Результаты. Наплавка с одиночным катодом (спаренная проволока) и со сдвоенным катодом (одиночная проволока). На рис. 9, *а* изображены макрошлифы из циклов наплавки с одиночным катодом со спаренной проволокой и со сдвоенным катодом и одиночной проволокой.

В профиле проплавления между циклами наплавки с одиночным катодом и спаренной проволокой на импульсном токе и наплавки со сдвоенным катодом с одиночной проволокой на постоянном токе прямой полярности никаких существенных визуальных изменений не обнаруживается. Отмечено, что содержание железа во всех трех наплавках находится на допустимом уровне (ниже 5 %). Скорость наплавки была достигнута соответственно 1,83 кг/ч (32 см/мин) и 2,98 кг/ч (50 см/мин) для наплавки с одиночным катодом со спаренной проволокой, и 4,23 кг/ч (80 см/мин) для наплавки GTAW со сдвоенным катодом с одиночной проволокой.

Наплавка со сдвоенным катодом (спаренная проволока) на импульсном постоянном токе прямой полярности. На рис. 10, *а* обзорно показана компактная обработка головкой со сдвоенным катодом внутри образца трубы диаметром 155 мм и продемонстрировано высокое качество поверхностного слоя (*б*), очевидно достигнутое применением данного новаторского способа.

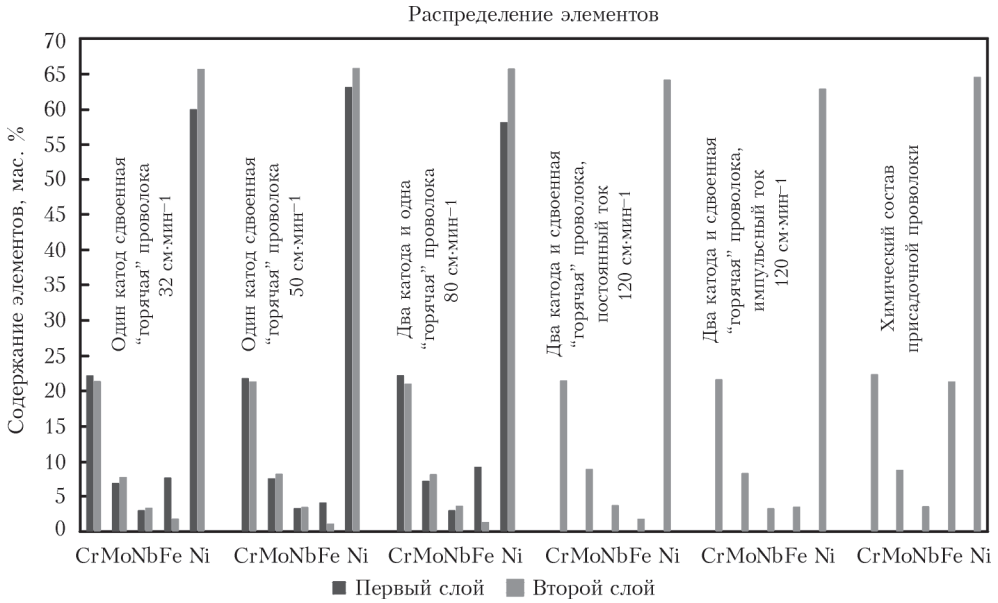

Рис. 13. Распределение элементов в наплавленном поверхностном слое в сравнении с химическим составом присадочной проволоки. Примечание: анализ наплавки со сдвоенным катодом со спаренной проволокой проведен только для второго слоя

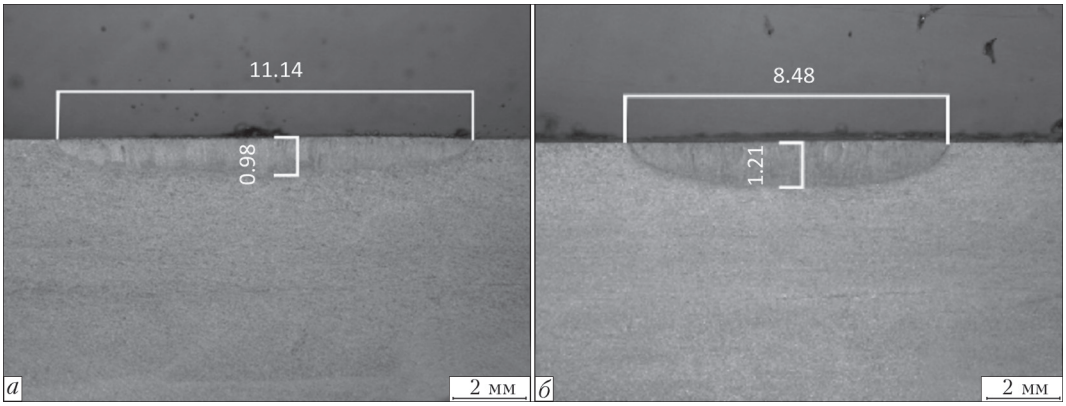

Рис. 14. Наплавка GTAW со сдвоенным катодом автономно, использующая электроды, расположенные продольно (*а*) и по нормали к направлению сварки (*б*). Примечание: диаметр катода 4,0 мм; суммарный ток сварки 300 А (2×150 А); зазор катода ~ 2,0 мм; рабочее расстояние электрода 4,0 мм и скорость перемещения 40 см/мин

В соответствии с данными параметров, приведенных в табл. 2, на рис. 11, *а*, *б* представлен макрошлиф, полученный EDX-анализом (энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии) (система: Oxford INCA Energy/PM55), выполненный во время экспериментов по наплавке со сдвоенным катодом.

Для всех циклов сварки на рис. 12 показано качество наплавки по содержанию железа на расстоянии 3,0 мм ниже поверхностного слоя, измеренного при помощи EDX-анализа. Как было обнаружено, скорость наплавки со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой значительно увеличилась и, соответственно, достигла значения примерно 5,6 кг/ч при постоянном токе прямой полярности и примерно 5,7 кг/ч при импульсном токе прямой полярности. Во время экспериментов была обнаружена более высокая однородность для более высоких значений тока — более высоких скоростей перемещения. Тем не менее, самая низкая скорость перемещения (32 см/мин) склонна создавать большие колебания в распределении химических элементов вдоль поверхности.

На рис. 13 представлен состав химических элементов поверхностного слоя, полученный при EDX-анализе с акцентом на основные легирующие элементы, в частности те, которые отвечают за коррозионную стойкость наплавленного слоя. Также, для сравнения сюда включен и анализ используемой присадочной проволоки. Аналогичное распределение элементов можно видеть и во втором слое, особенно при использовании новаторского метода наплавки GTAW со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой, где различия относительно химического состава сварочных материалов минимальны, за исключением, конечно, того, что содержание железа в проволоке было намеренно снижено.

На основании теоретических предположений относительно разного влияния, которое возможно зависит от изменения углов ориентации двух катодов, т.е. от продольного до нормального, что связано с направлением сварки, дополнительные исследования применения системы со сдвоенным катодом проводились для обоих случаев. В соответствии с исследованиями и численным моделированием, проведенным С. Лен и др. [23], можно отметить заметные различия.

На рис. 14, *а* показан макрошлиф для варианта, когда вольфрамовые электроды расположены продольно в направлении сварки, в то время как на рис. 14, *б* — электроды, откорректированы на 90°, чтобы добиться их расположения по нормали к направлению сварки.

Ощутимые различия между двумя настройками можно легко заметить. В дальнейшем, как необходимое условие, предлагается, например, добиться установления достоверных количественных данных относительно влияния электродов, имеющих различную ориентацию, на степень разбавления металла шва и распределение элементов.

Обсуждение. Ценность результатов, проведенных экспериментов состоит в том, что они позволяют количественно сравнивать данные высокоэффективных традиционных процессов наплавки GTAW, т.е. GTAW со спаренной «горячей» проволокой с новаторским методом, именуемым GTAW со сдвоенным катодом.

Последний может быть использован как с применением одиночной, так и спаренной присадочной проволокой, что ведет к достижению значительно более высоких скоростей наплавки. Были выбраны данные сварочных экспериментов, которые отличаются на предварительном этапе, когда используется прототип оборудования со сдвоенным катодом, а на заключительном этапе особое внимание сосредоточено на промышленном применении и направлено на достижение обоснованной оценки характеристик процесса и удовлетворяющих характеристик качества, которые подтверждаются другими исследованиями.

Несмотря на то, что за основу взяли сварку плавлением и GTAW с множеством катодов (была исследована такими учеными, как Дж. Нориш [21], М. Ямада [18, 19] и К. Кобаяши и др. [20]), мы смогли дополнить новыми данными разработанный новаторский способ, который, прежде всего, способен увеличить скорость перемещения дуги с предупреждением дефектов сварки и повышением производительности наплавки. Тем не менее, по количественному подтверждению и, следовательно, только по качественному предположению на данном этапе, мы полагаем, что основополагающий механизм, влияющий как на низкое разбавление, так и на устранение дефектов сварки (подрез), возникает при более низком давлении дуги с одинаковым суммарным током по сравнению со сваркой с одиночным катодом, что связано с определенным расположением катода в разработанной сварочной головке. Необходимо отметить, однако, что результаты, полученные в работе, по сравнению с результатами других исследователей значительно отличаются друг от друга. Так, К. Кобаяши и др. [20] обнаружили, что давление дуги равно примерно 1500 Па для одиночного катода (сварочный ток 200 А + «длина дуги» 2 мм) и примерно 250 Па при расположении со сдвоенным катодом. При том же суммарном токе и аналогичными экспериментальными настройками Г. Чжан и др. [22] и С. Лен и др. [23] определили максимальное давление дуги примерно 500 Па (с одиночным катодом) и примерно 95 Па (со сдвоенным катодом).

Помимо этих различий, тем не менее, мы считаем, что соотношение между значением сварочного тока и давлением дуги, как, например, согласно постулату Й. Адоний др. [15] и С. Рохмена и А. Гуи [16], применимо также и к наплавке GTAW с «горячей» проволокой, по крайней мере, для условий экспериментов, описанных в данной статье. Это связано с более высокими коэффициентами разбавления, наблюдаемыми при наплавке со сдвоенным катодом на импульсном токе (что таким образом увеличивает средний ток) по сравнению с наплавкой на постоянном токе прямой полярности.

Несмотря на то, что был достигнут более высокий средний ток сварки, было обнаружено, что при импульсном цикле происходило сравнительно небольшое повышение скорости наплавки. Это предположительно можно объяснить лишь незначительным увеличением скорости подачи проволоки по сравнению с циклом на постоянном токе (5,0 м/мин по сравнению с 4,8 м/мин). Учитывая дальнейшие соотношения разбавления, было обнаружено увеличение импульсного тока GTAW и, соответственно, можно предположить о постоянном соотношении между скоростью подачи проволоки и током «горячей» проволоки, несмотря на утверждающие результаты К. Шинозаки и др. [14]. Можно предположить, что на плавление присадочной проволоки больше всего влияет ток «горячей» проволоки. Это мнение отлично от того, при котором считают, что плавление присадочной проволоки является функцией тока дуги. Тем не менее, на наш взгляд, целесообразно проведение дальнейшей работы по оценке двух этих предположений, а также соотношения между скоростью подачи проволоки, током «горячей» проволоки и током дуги.

Учитывая наши эксперименты (см. рис. 14) по изменению угла ориентации двух катодов, которое связано с направлением сварки, мы принимаем предположения С. Лена и др. [23] об изменении плотности тока и температурных полей вокруг катодов, что подчеркивает необходимость проведения дальнейших исследований. Это особенно касается наплавки GTAW со сдвоенным катодом со спаренной «горячей» проволокой. Следовательно, несмотря на отсутствие практических доказательств в исследованиях, рассматриваемых в данной статье, предполагается, что и разбавление металла шва и высота наплавленного валика могут иметь непосредственную зависимость от угла ориентации двух катодов, тем самым влияя в дальнейшем на распределение элементов в металле шва и такие свойства, как, например, сопротивление коррозии наплавленного слоя.

Выводы

Из экспериментов, описанных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

• Наплавка (GTAW) с одиночным катодом и с «горячей» проволокой (с использованием двух проволок диаметром 1,2 мм и характерным химическим составом UNS N06625) подтвердила свою надежность, показав результаты сварки, всецело соответствующие промышленным требованиям.

• Новаторская система дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде защитных газов (GTAW) со сдвоенным катодом прошла сравнение с системой наплавки с одиночным катодом.

• Новаторская система доказала свою способность к значительному увеличению показателей сварки, т.е. производительности наплавки и скорости перемещения, и, самое главное, надежному соответствию всем промышленным требованиям.

• Была проведена количественная оценка содержания железа, как показателя, определяющего качество наплавленного слоя, которое надежно оставалось ниже порогового значения при использовании систем наплавки GTAW со сдвоенным катодом как с одиночной проволокой (сварка в положении «PA»), так и спаренной проволокой (сварка в положении «PC»).

• Соотношение между значением сварочного тока и давлением дуги подтвердилось и показало свою применимость также и к экспериментальным настройкам, которые использовались в данном исследовании.

• Несмотря на отсутствие количественного подтверждения, сниженное давление дуги считается в данном исследовании основным фактором уменьшения глубины проплавления во время наплавки GTAW со сдвоенным катодом, что таким образом значительно снижает коэффициент разбавления наплавленного металла с основным по сравнению с наплавкой GTAW с одиночным катодом при аналогичном значении сварочного тока.

• Считается, что на скорость наплавки в основном влияет ток «горячей» проволоки в отличие от тока дуги, и в этом отношении наши результаты подтверждаются данными других исследователей.

• Считается, что результаты эксперимента с изменением угла ориентации сдвоенного катода, что связано с направлением сварки (продольным или по нормали), подтверждают теоретические предположения других исследователей о целесообразности проведения дальнейшей работы.

• Считается, что наплавка GTAW со сдвоенным катодом будет в будущем постоянно и надежно расширять диапазон применений, где требуется высокая производительность и соблюдение критерия «нулевого дефекта».

1. *Egerland S.* Control led GMA welding processes prove applicability for high-quality weld overlay. In: Proceedings of the welding and repair technology for power plants: 9th international EPRI Conference; 2010 June 23-25; Fort Myers. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2010.
2. *Egerland S.* Status and perspectives in overlaying under particular consideration of sophisticated welding processes. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 2009, –27(2), P. 50–54.
3. *Egerland S., Helmholdt R.* Overlaying (cladding) of high temperature affected components by using the cold metal-transfer process. In: Mayr P., Editor. Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry. Austria: Verlag der Technischen Universitat Graz, 2008. P. 327–332.
4. *Freeman N.D., Manz A.F., Saenger JF.Jr., Stanchus F.T.*, inventors; Union Carbide Corp, assign. Method for depositing metal with a TIG arc. United States patent US 3483354.1969 Dec 9.
5. *Manz A.F., Norman R., Wroth R.S.*, inventors; Union Carbide Corp, assign. Electric arc working with hot wire addition. United States patent US 3163743.1964 Dec 29.
6. *Manz A.F.*, inventors; Union Carbide Corp, assign. Consumable electrode arcless electric working. United States patent US 3122629A. 1964 Feb 25.
7. *Hori K., Myoga T., Shinomiya M., Eiji W., Kazuki K., Toshiaki T.* et al., inventors; Kaisha BHK, assign. Semi-automatic hot wire TIG welding equipment. United States patent US 4801781. 1989 Jan 31.
8. Mizuno T., Shimizu T., inventors; Kaisha MDK, assign. Hot wire welding system. United States patent US 4464558A. 1984 Aug 7.
9. *Goldsberry C.* Hot-wire TIG: not new but gaining appeal [web page], [access in 3 oct. 2015]. Cleveland: Welding Design & Fabrication; 2007. Available from: http://weldingdesign.com/archive/hot-wiretig-not-new-gaining-appeal.
10. *Manabe Y., Wada H., Zenitani S., HiromoloY., HashimotoY.* Investigation on TIG welding using 2 filler wires with electromagnetically controlled molten pool process in horizontal position. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. 2000. –18(l). – P. 40–50. http://dx.doi.org/10.2207/qjjws.18.40.
11. *Hori K., Watanabe H., Myoga T., Kusano K.* Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire: research on pulse heated hot wire TIG welding processes. Welding International. – 2004, 18(6). – P. 456–468. http://dx.doi.org/10.1533/wint.2004.3281.
12. *Ueguri S., Tabata Y., Shimizu T., MizunoT.* A study on control of deposition rate in hot-wire TIG welding. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 1986. – 4(4). – P. 678–684. http://dx.doi.org/10.2207/qjjws.4.678.
13. *Yamamoto M., Shinozaki K., Myoga T., Kanazawa T., Arashin H.* Development of ultra-high-speed GTA welding process using pulse-heated hot-wire. In: Pre-Prints of the 82nd National Meeting of JWS, Tokyo: Japan Welding Society, 2008. – P. 228–229.
14. *Shinozaki K.,Yamamoto M., Nagamitsu Y., Uchida T., Mitsuhata K., Nagashima T.* et al. Melting phenomenon during ultra-high-speed GTA welding method using pulse-heated hotwire. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. 2009. – 27(2). – P. 22–26. http:/dx.doi.org/10.2207/qjjws.27.22s.
15. *Adonyi Y., Richardson R., Baeslack W.* Investigation of arc force effects in subsurface GTA welding. Welding Journal. – 1992. – 71(9). – P. 321–330.
16. *Rokhlin S., Guu A.* A study of arc force, pool depression, and weld penetration during gas tungsten arc welding. Welding Journal. – 1993. – 72(8). – P. 381–390.
17. *Mendez P., EagarT.* Penetration and defect formation in high-current arc welding. Welding Journal. – 2003. – 82(10). – P. 296–306.
18. *Yamada M.* Development of high efficiency TIG welding method. 1st Report of the Japan Welding Society. – 1998. – 63. – P. 24–25.
19. *Yamada M., Tejima A.*, inventors; Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., assign. TIG welding apparatus and method. United States patent US 6982397. 2006 Jan 3.
20. *Kobayasrv K., NishimuraY., IijimaT., Ushio M., Танака M., Shimamura J.*, et al. Practical application of high efficiency twin-arc TIG welding method (SEDAR-TIG) for PCLNG storage tank. Welding in the World. 2013. – 48(7-8). P. 35–39.
21. *Norrish J.* Advanced welding processes. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.
22. *Zhang G., Leng X., Lin W.* Physics characteristic of coupling arc of twin-tungsten TIG welding. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2006. –16(4). – P. 813–817.
23. *Leng X., Znang G., Wu L.* The characteristic of twin-electrode TIG coupling arc pressure. Journal of Physics D, Applied Physics. – 2006. – 39(6). – P. 1120–1126. http://dx.doiorg/10.1088/0022-3727/39/6/017.
24. *Maecker H.* Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression. Zeitschrift für Physik. – 1955. – 141(1). – P. 198–216.
25. *Zhang G., Xiong J., Gao H., Wu L.* Effect of process parameters on temperature distribution in twin-electrode TIG coupling arc. – Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2012. – 113(15). – P. 1938–1945. http://dx.doi.org/10.1016/jqsrt.2012.05.018.
26. *Martins A.* Avaliacaoda soldagem tig autogena duplo catodo twin Tig [trabal ho de graduacao], Fionanopolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2010.
27. Special Metal Corporation. Inconel alloy 625. Special metals. 2006. – Material Manufacturer Data Sheet.

Поступила в редакцию 15.01.2016