

УДК 669.187.24:669.162.2/4:621.791.14

<sup>1</sup>Сотников А. Л., <sup>1</sup>Пасечник С. Ю., <sup>2</sup>Вишневский Д. А., <sup>2</sup>Орлов А. А.,  
<sup>3</sup>Каленская А. В., <sup>3</sup>Муховатый А. А.

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет,

<sup>2</sup>Донбасский государственный технический университет,

<sup>3</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Выполнен анализ способов сварки трением с перемешиванием с позиции решения технологических проблем сварки воздушных фурм доменных печей. Решение проблем заключается в изменении конструкции сварных соединений воздушной фурмы таким образом, чтобы стало возможным применить сварку трением с перемешиванием, используя сварочный инструмент с изменяемой геометрией и специализированную сварочную машину или роботизированную сварочную головку.

**Ключевые слова:** воздушная фурма, сварка трением с перемешиванием, сварочный инструмент, тип сварного соединения, сварочная машина, сварочная головка.

**Введение.** Развитие сварки трением с перемешиванием (СТП) за последние несколько десятилетий привело к появлению множества разновидностей процесса сварки, а также к выявлению проблем, характерных только для данного способа сварки. СТП нашла применение как для получения линейных (стыковых и кольцевых) и точечных сварных соединений, так и для нанесения тонких покрытий на толстую подложку.

Значительным преимуществом внедрения СТП является то, что получаемые сварные соединения сразу же после завершения процесса сварки готовы к дальнейшему использованию. Затраты на зачистку шлака, шлифование, полирование, выравнивание практически исключены. Основная проблема на этапе внедрения СТП в производство металлоконструкций заключается в том, что конструкции, разработанные под сварку плавлением, не всегда подходят для применения СТП. Ограничивающим фактором являются относительно высокие силы прижатия свариваемых деталей и наличие подкладки или второго инструмента с обратной стороны [1]. Для простых случаев конструкции сварных соединений достаточно спроектировать специальное прижимное устройство, в противном случае

требуется изменение конструкции самого сварного соединения.

В качестве примера рассмотрим применение СТП для изготовления сварной конструкции воздушных фурм доменных печей [2].

**Способы СТП и особенности получаемых сварных соединений.** Технологические возможности СТП позволяют выполнять различные типы сварных соединений (рис. 1) [3]:

- стыковое соединение — самое распространенное, т. к. не требует специальных форм инструмента, а также не требует подготовки кромок (рис. 1, а);

- нахлесточно-стыковое соединение представляет собой тоже стыковое соединение, только в качестве одной из соединяемых деталей выступает биметаллическая пластина (рис. 1, б);

- нахлесточное соединение чаще всего используется, когда необходимо соединить детали разной толщины, т. к. это соединение позволяет сварить практически любые толщины между собой, но необходима определенная подготовка кромок под сварку (рис. 1, в);

- пакетная сварка (многослойное нахлесточное) технически выполняется так же,

как и стыковая, но здесь более строгие требования к выбору сварочного инструмента, т. к. необходимо проварить все имеющиеся слои материала для удовлетворительного качества сварного соединения (рис. 1, *з*);

– двухпроходное тавровое соединение (рис. 1, *д*) и тавровое соединение одним швом на прорез (рис. 1, *е*) — очень сложные соединения по технологии, т. к. необходимо очень точно позиционировать сварочный инструмент в месте сварки;

– угловое соединение с внешней стороны выполняется так же, как и стыковое соединение (рис. 1, *ж*);

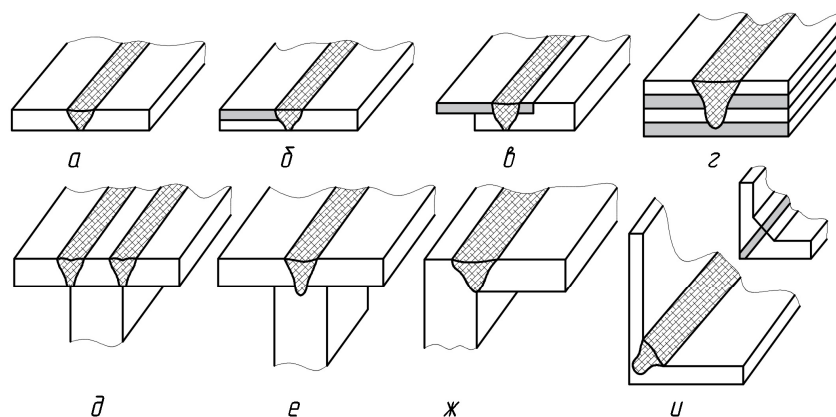
– угловое соединение с внутренней стороны требует определенной подготовки свариваемого стыка, т. к. без данной подготовки выполнение такого соединения не представляется возможным (рис. 1, *и*).

В традиционном варианте установка сварочного инструмента при СТП осуществляется под углом к сварному шву (в поперечной плоскости — под прямым углом, в продольной плоскости — под углом 88–89°), а линейное перемещение инструмента, с одновременным вращением, происходит вдоль шва (рис. 2). При этом траектория движения может быть прямо- и криволинейная. Эти обстоятельства также накладывают ограничения на конструкцию как

сварного соединения, так и прижимного устройства, которые не должны ограничивать свободное перемещение инструмента.

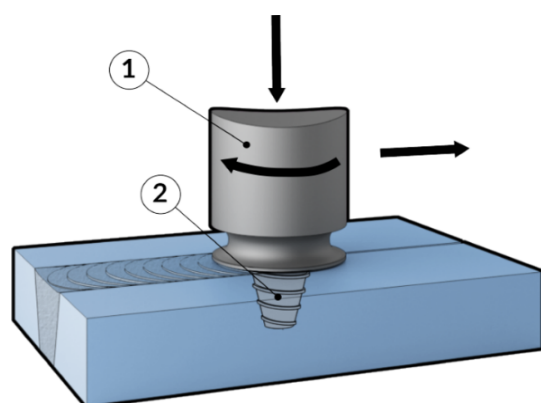
При реализации процесса СТП следует принимать во внимание следующие существенные технологические недостатки процесса сварки. Во-первых, в конце сварного шва остается несквозное отверстие, повторяющее форму наконечника, а во-вторых, в начале шва может быть непровар кромок, поскольку инструмент внедряется в холодный непластифицированный металл [1, 3]. Как правило, для обеспечения качества СТП в начале и конце шва рекомендуется, соответственно, начинать и заканчивать процесс сварки на вводных и выводных (технологических) планках.

Еще одной проблемой СТП является большая вероятность образования дефекта типа «непровар» в корне шва, т. к. длина наконечника инструмента несколько меньше толщины свариваемых деталей, а толщина свариваемых кромок может изменяться по длине стыка [1, 4]. Эту проблему решают, используя подкладку с канавкой, расположенной вдоль стыка заготовок. Во время сварки корень шва выдавливается в формирующую подкладку. После сварки усиление шва (в корневой части) может быть удалено.



а — стыковое; б — нахлесточно-стыковое; в — нахлесточное; г — многослойное нахлесточное; д — двухпроходное тавровое; е — тавровое прорезное; ж, и — угловое

Рисунок 1 — Типы сварных соединений, выполняемых СТП



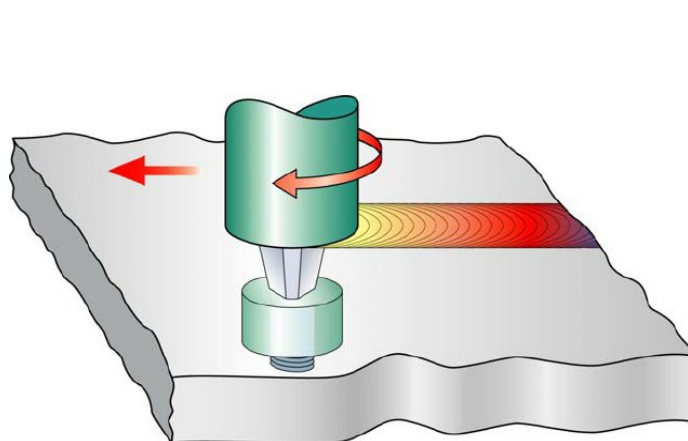
1 и 2 — хвостовик и наконечник инструмента соответственно

Рисунок 2 — Схема (слева) и внешний вид (справа) линейной СТП двух заготовок

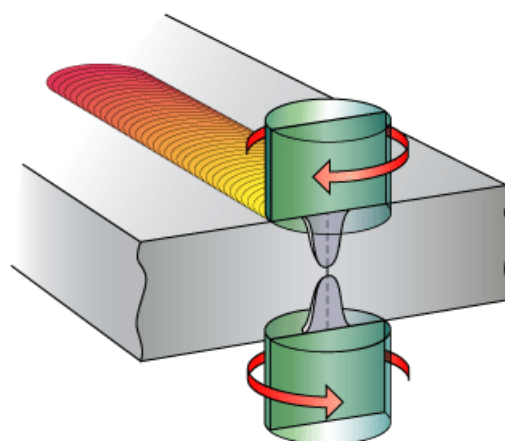
Проблема формирования бездефектного корня сварного шва решается также технологией Bobin Stir Welding [5]. Схема соответствующего процесса сварки приведена на рисунке 3, а. Технология предполагает использование сварочного инструмента, состоящего из верхнего и нижнего заплечиков, вращающихся и перемещающихся как одно целое. Нижний заплечик в данном случае выполняет функцию подкладки.

При СТП больших толщин основной проблемой является необходимость в жестком закреплении заготовок из-за дей-

ствия на них высокого крутящего момента. Решение этой проблемы было найдено путем разработки технологии двухсторонней синхронной сварки, которая также решает проблему формирования дефектного корня шва [6]. На рисунке 3, б представлена схема данного процесса. В этом случае процесс ведется без подкладки, а разное направление вращения инструментов с обеих сторон сварного соединения существенно снижает крутящий момент, а также способствует более равномерному его нагреву по толщине.



а



б

Рисунок 3 — Схема СТП по технологии Bobin Stir Welding (а) [5] и двухсторонней синхронной сварки с разнонаправленным вращением инструментов (б) [6]

Использование двух инструментов привело к появлению технологии Twin-Stir™ [6]. При последовательном движении инструментов друг за другом первый предварительно подогревает металл, а второй осуществляет сварку, согласно схеме на рисунке 4, а. Вращающиеся в противоположные стороны инструменты уменьшают влияние крутящего момента на заготовку; повышается качество шва, улучшается разрушение оксидных пленок без потери механических свойств шва. При параллельном движении значительно увеличивается ширина сварного шва, что применяется при сварке нахлесточных соединений (рис. 4, б): вдоль образуемого шва перемещаются два инструмента, вращающиеся в разные стороны. Расстояние между инструментами должно быть выбрано таким, чтобы зоны перемешивания перекрывались. Применение дополнительного подогрева позволяет увеличить скорость сварки и снизить частоту вращения инструмента. Некоторое смещение по направлению движения двух инструментов, как показано на рисунке 4, в, позволяет использовать преимущества последователь-

ного и параллельного движения сварочных инструментов. Данная технология предъявляет требования по применению многшпиндельных сварочных машин (головок).

Помимо сварки прямолинейных швов, способом СТП возможна сварка кольцевых швов. Основная проблема при сварке кольцевых швов — это завершение процесса сварки таким образом, чтобы исключить образование выходного отверстия от наконечника.

Концерн ESAB предложил оригинальное техническое решение при изготовлении кольцевых швов медных контейнеров для хранения радиоактивных веществ [7], где начало и конец шва при сварке выводятся из зоны стыка (рис. 5), решив тем самым проблему остающегося отверстия в основном металле, которое можно затем заварить другими способами сварки. Также решается проблема непровара кромок в начале шва путем повторного переваривания начального участка шва перед выводом инструмента из зоны стыка.

Применение сварочного инструмента с изменяющейся геометрией значительно упростило сварку кольцевых швов [8].

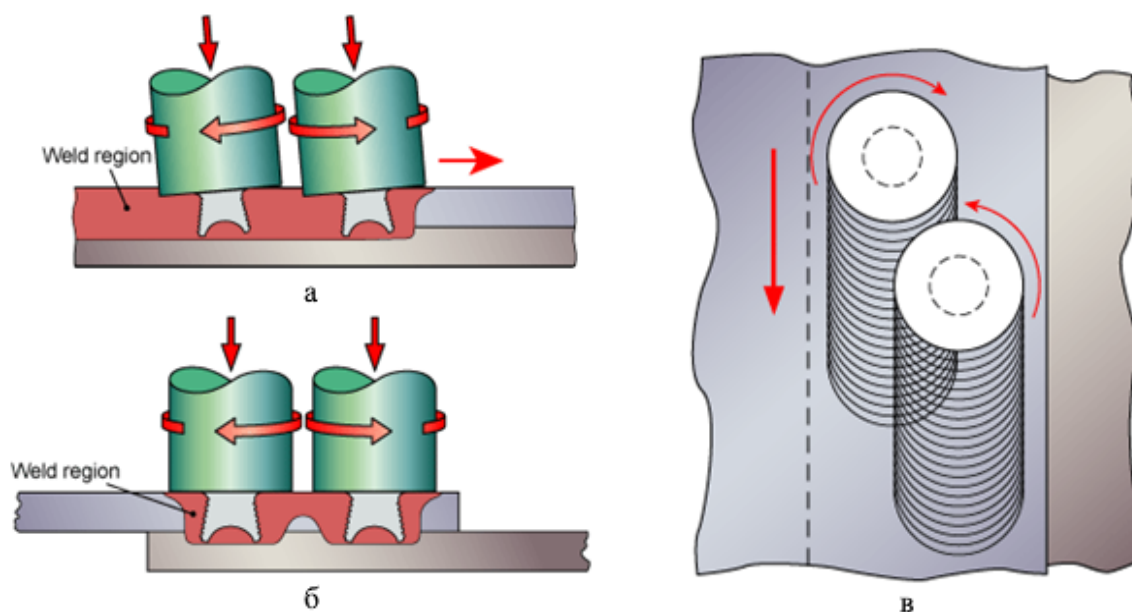


Рисунок 4 — Схема СТП по технологии Twin-Stir™ [6] с последовательным (а), параллельным (б) и смещенным (в) движением сварочных инструментов [6]

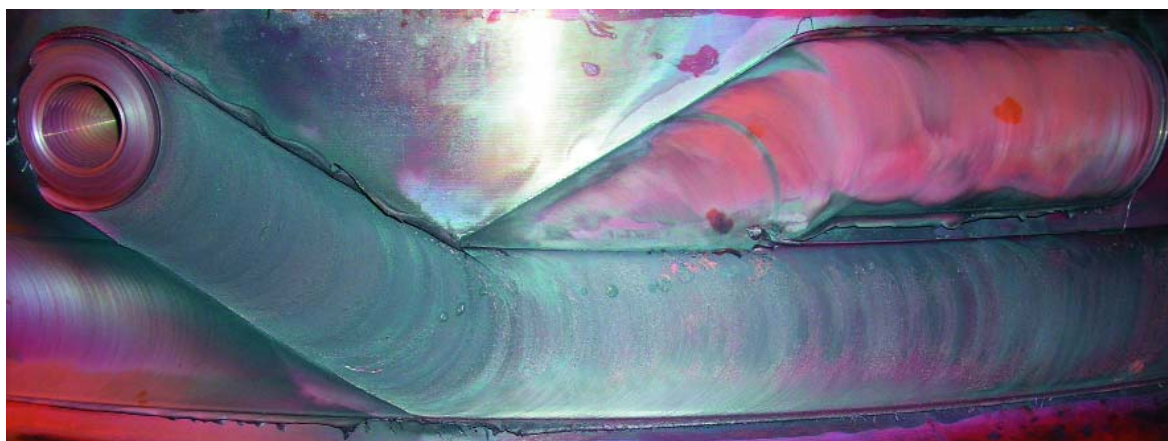


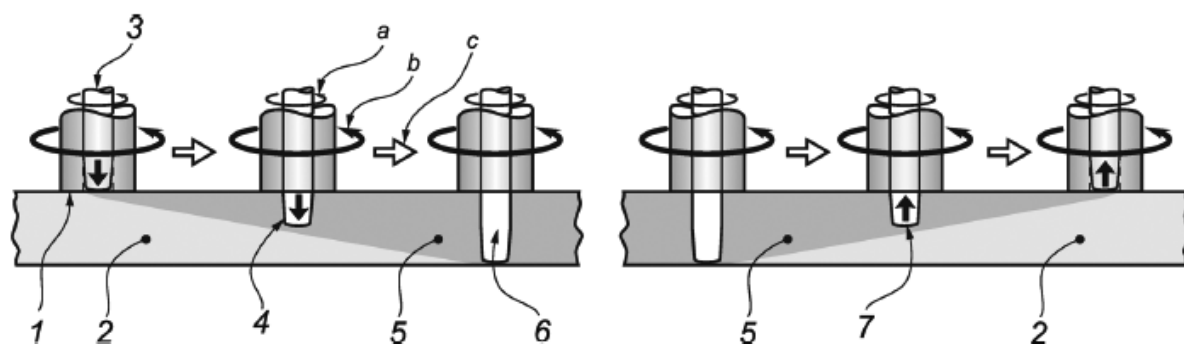
Рисунок 5 — Схема начала и завершения сварки кольцевого шва с образованием выходного отверстия над линией стыка в основном металле [7]

Разработка технологии сварки с раздельным движением наконечника и заплечика дает также возможность снизить скорость вращения заплечика при повышенной скорости вращения наконечника, способствуя тем самым уменьшению тепловыделения при сварке [1, 8]. Данное обстоятельство имеет важное значения при сварке тугоплавких металлов, когда значительно увеличивается нагрузка на инструмент и, соответственно, растёт степень его износа. Традиционное решение этой проблемы заключается в применении предварительного подогрева металла непосредственно перед движущимся инструментом. За счет этого происходит уменьшение

усилия на инструмент и заготовку, что позволяет увеличить скорость сварки. В совокупности это ведет к повышению ресурса инструмента.

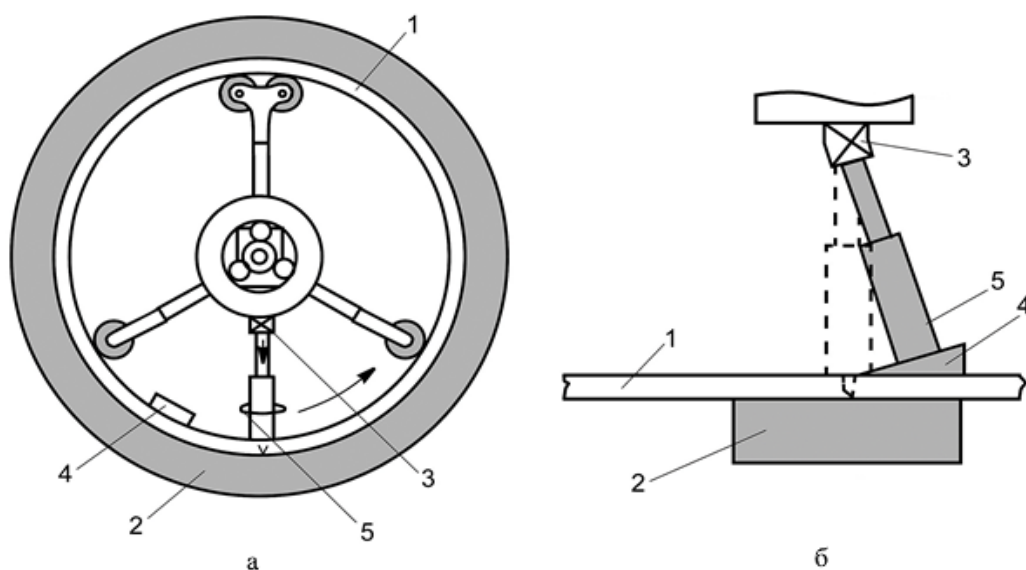
В начале сварки наконечник постепенно внедряется на нужную глубину, а в конце процесса сварки, после того как начало шва повторно было переварено, наконечник постепенно выводится из металла согласно схеме, приведенной на рисунке 6.

Использование в качестве технологической планки клинообразной пластины для вывода сварочного инструмента (рис. 7 и 8) также открывает возможности сварки как снаружи, так и изнутри изделий цилиндрической формы.



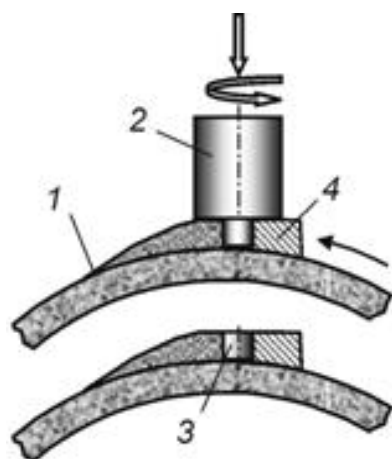
1 — заплечик; 2 — свариваемая заготовка; 3 — наконечник; 4 — наконечник, движущийся вниз; 5 — сваренная заготовка; 6 — наконечник в требуемом положении для сварки; 7 — наконечник, движущийся вверх; а — направление вращения наконечника; б — направление вращения заплечика; с — направление сварки

Рисунок 6 — Схема СТП по технологии с раздельным движением наконечника и заплечика (ГОСТ ISO 25239-1-2020)



а и б — вид в поперечном сечении и продольном сечении изделия соответственно;  
1 — изделие (труба); 2 — опорное кольцо в роли подкладки; 3 — шарнирное соединение;  
4 — клиновидная пластина для вывода инструмента; 5 — сварочный инструмент

Рисунок 7 — Схема СТП кольцевого соединения изнутри изделия цилиндрической формы [9]



1 — кольцевой шов; 2 — сварочный инструмент;  
3 — отверстие, остающееся после вывода инструмента; 4 — клиновидная пластина для вывода инструмента

Рисунок 8 — Схема СТП кольцевого соединения снаружи изделия цилиндрической формы

Существуют также и другие технологии СТП, например Re-Stir™ и Skew-Stir™ [10], где за счет режимов движения и геометрии инструмента оказывается непосредственное воздействие на внутреннюю структуру и ширину сварного шва.

### Возможности СТП применительно к сварной конструкции воздушной фурмы.

В сварной конструкции воздушной фурмы доменной печи, чертеж которой приведен на рисунке 9, предусмотрено два прямолинейных и четыре (два наружных и два внутренних) кольцевых сварных соединения. Прямолинейные соединения используются при изготовлении наружного конуса 1 и внутреннего стакана 2. Кольцевые соединения используются для сварки конуса и стакана с рылом 3 и фланцем 4.

Выполненный анализ способов СТП и особенностей получаемых сварных соединений определил ряд следующих требований к решению технологических проблем сварки воздушных фурм доменных печей:

- все сварные соединения фурмы должны быть наружными, т. к. размеры деталей фурм значительно меньше размеров используемых сварочных инструментов и шпинделей, чтобы иметь возможность выполнять СТП изнутри фурмы;

- кольцевые сварные соединения наружного конуса с рылом и фланцем должны иметь нахлесточно-стыковой тип (см. рис. 1, б), что позволяет исключить исполь-

зование опорных колец в роли подкладок, т. к. сами детали фурмы — рыло и фланец — могут выполнять роль подкладки;

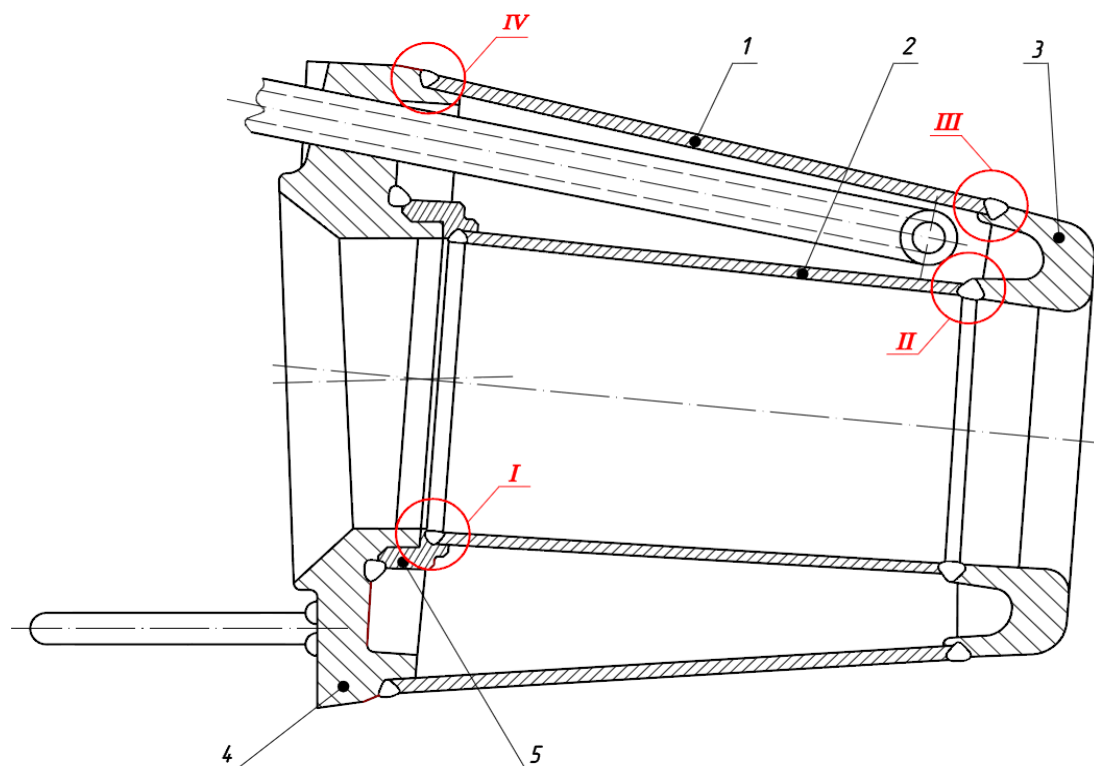
– кольцевые сварные соединения внутреннего стакана с рылом и фланцем должны иметь стыковой тип (см. рис. 1, а), что потребует использования достаточно простых опорных колец в роли подкладок;

– для кольцевых сварных соединений необходимо использовать сварочный инструмент с изменяемой геометрией, что исключает использование клиновидных пластин для вывода инструмента.

Выполнение кольцевых сварных швов с применением СТП, независимо от того, будет ли использоваться сварочный инструмент с изменяемой геометрией или клиновидная технологическая пластина, обуславливает необходимость применения специализированных сварочных машин (рис. 10, а) или роботизированных сварочных голо-

вок (рис. 10, б). В первом случае машина (головка) должна обеспечивать раздельное движение наконечника и заплечика, а во втором случае — обеспечивать автоматическую установку и крепление клиновидной пластины, а также задавать соответствующую траекторию движения инструмента.

Например, концерн ESAB разработал серию сварочных машин Legio™ (см. рис. 10, а) для сварки алюминия и других цветных металлов. Серия состоит из семи различных типоразмеров и пяти базовых моделей компоновок: модели S, ST, U, UT — с одной сварочной головкой, а модель ST-с — с двумя головками. Модели S и ST представляют собой установки для сварки прямолинейных швов (по двум координатным осям), модели U и UT — для сварки 2-D швов (по трем координатным осям), а модель ST-с — для сварки полых профилей.



1 — медный наружный конус; 2 — стальной внутренний стакан; 3 — рыло из меди;  
4 — стальной фланец; 5 — стальная втулка

Рисунок 9 — Вертикальное сечение воздушной фурмы, изготавливаемой методом сварки

Концерн ESAB также разработал роботизированную систему СТП Rosio™ (см. рис. 10, б), которая обеспечивает гибкую перенастройку для получения сварных соединений сложных конструкций, предпочтительно из алюминия. Такое решение позволяет выполнять сварные швы в произвольном направлении трехмерного рабочего пространства. В основе системы используется роботизированный манипулятор ABB IRB 7600, модифицированный для СТП с системой управления IRC5. Сварочная головка интегрирована в механическую конструкцию манипулятора, не ограничивая стандартную рабочую зону робота. Доступное рабочее пространство робота занимает более 2,5 м, на которое во

время сварки может быть приложено прижимное усилие до 13 кН.

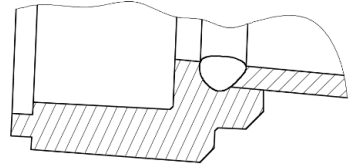
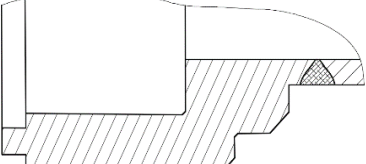
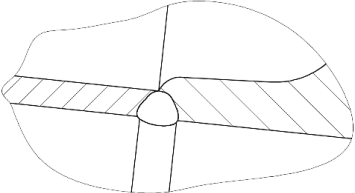
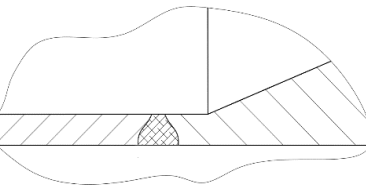
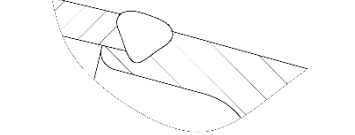
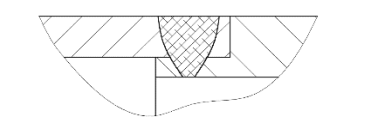
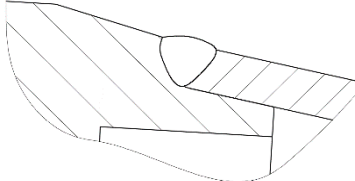
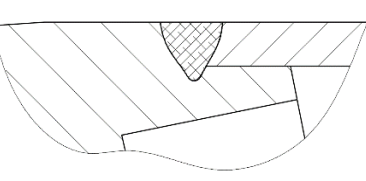
Обе установки успешно применяются в космическом и авиастроении, автомобилестроении, судостроении, энергетике и многих других отраслях промышленности.

С учетом вышеизложенных результатов анализа в таблице 1 приведены предполагаемые модификации сварных соединений сварной конструкции воздушных фурм под применение технологии СТП.

В дальнейшем под конкретную сварную конструкцию воздушной фурмы доменной печи и задействованную сварочную машину (головку) необходимо спроектировать специальные прижимные устройства.

Таблица 1

Модификация сварных соединений сварной конструкции воздушных фурм доменных печей под применение СТП

| Сварное соединение воздушной фурмы<br>(рис. 9) |                                                                                     |                         | Схема сварного соединения,<br>выполняемого СТП                                       |                                      |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| вид                                            | чертеж                                                                              | тип                     | схема                                                                                | тип                                  |
| I                                              |  | кольцевой<br>внутренний |  | стыковой<br>наружный                 |
| II                                             |  |                         |  |                                      |
| III                                            |  | кольцевой<br>наружный   |  | нахлесточно-<br>стыковой<br>наружный |
| IV                                             |  |                         |  |                                      |

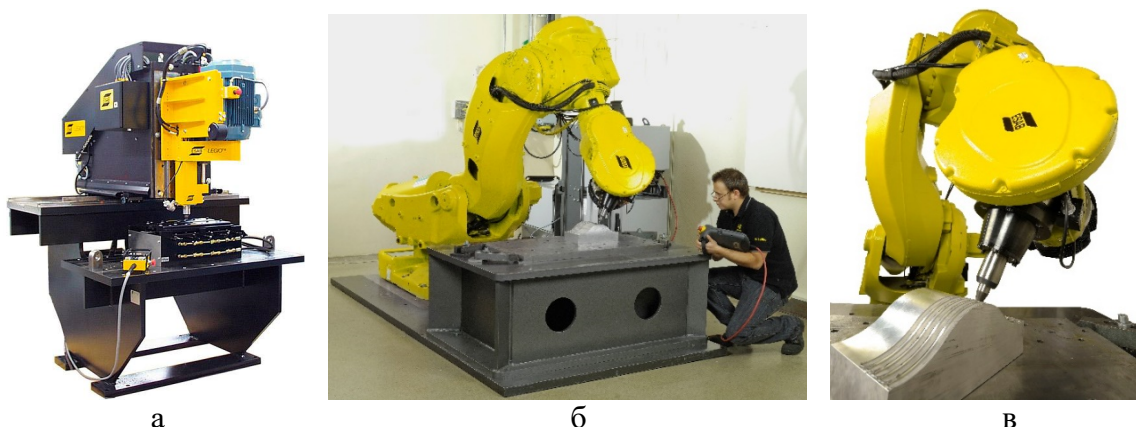


Рисунок 10 — Внешний вид сварочной машины Legio™ (а) и роботизированной сварочной головки Rosio™ (б, в), предлагаемых концерном ESAB [11]

**Заключение.** С точки зрения применения СТП для изготовления сварной конструкции воздушной фурмы доменной печи возникает ряд сложных конструкторско-технологических задач. Конструкторские задачи связаны, во-первых, с изменением типа сварных соединений воздушной фурмы (главным образом необходимо использовать только наружные сварные соединения), а во-вторых, с разработкой технологической оснастки (опорно-прижимных

устройств, сварочного инструмента с изменяемой геометрий) и адаптацией сварочной машины (головки) под конкретные размеры изготавливаемой воздушной фурмы. Технологические задачи в основном связаны с разработкой геометрии наконечника сварочного инструмента и выбором рациональных режимов сварки однородных соединений из меди и разнородных соединений «медь — сталь», характерных для сварной конструкции воздушной фурмы.

### Библиографический список

1. Котлышев Р. Р. Сварка трением с перемешиванием. Ростов н/Д : Изд. центр ДГТУ, 2012. 137 с.
2. Устройство и проектирование доменных печей : учебное пособие / Л. И. Каплун [и др.]. Екатеринбург : УрФУ, 2016. 219 с.
3. Стаценко В. Н. Тепловые процессы при сварке трением с перемешиванием. Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. 120 с.
4. Сотников А. Л., Мухоматов А. А., Орлов А. А. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием // Сварка и диагностика. 2022. № 3. С. 19–24. DOI: 10.52177/2071-5234\_2022\_03\_19.
5. Thomas W. M. Friction stir welding — process variants // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-process-variants-an-update-october-2007> (дата обращения: 01.03.2023).
6. Staines D. J. The simultaneous use of two or more friction stir welding tools [Электронный ресурс] // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-simultaneous-use-of-two-or-more-friction-stir-welding-tools-january-2005> (дата обращения: 01.03.2023).
7. Седерквист Л. Сварка на тысячелетия. Ротационная сварка трением применяется для заварки медных контейнеров с толщиной стенки 50 мм, используемых для хранения радиоактивных отходов Швеции // Svetsaren. 2005. № 2. С. 31–33.
8. Фрикционная сварка алюминиевых лайнеров металлокомпозитных баллонов высокого давления / В. А. Половцев [и др.] // Сварочное производство. 2007. № 12. С. 24–27.

9. Thomas W. M. Friction stir welding developments (April 2002) [Электронный ресурс] // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-developments-april-2002> (дата обращения: 01.03.2023).

10. Consonni M. Processi di saldatura ad energia concentrata e FSW [Электронный ресурс] // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/italian/recenti-sviluppi-nei-processi-di-saldatura-ad-energia-concentrata-e-friction-stir-welding> (дата обращения: 01.03.2023).

11. Brennan M. Friction stir welding expands its scope [Электронный ресурс] // The Fabricator : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/shopmanagement/friction-stir-welding-expands-its-scope> (дата обращения: 01.03.2023).

© Сотников А. Л., Пасечник С. Ю.

© Вишневский Д. А., Орлов А. А.

© Каленская А. В., Муховатый А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ОМД ДонНТУ Снитко С. А.,  
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 25.05.2023.

**Doctor of Technical Sciences Sotnikov A. L., PhD in Engineering Pasechnik S. Yu.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, the Russian Federation), **Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., Orlov A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation), **PhD in Engineering Kalenskaia A. V., PhD in Engineering Mukhovaty A. A.** (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, LPR, the Russian Federation)

# TECHNOLOGICAL FEATURES OF FRICTION STIR WELDING THE AIR TUYERES OF BLAST FURNACES

Analysis of methods of friction stir welding from the position of solving technological problems of welding air tuyeres of blast furnaces is carried out. The problems solution lies in changing the design of welded air tuyere joints so that it is possible to use friction stir welding, using a welding tool with variable geometry and a specialized welding machine or a robotic welding head.

**Key words:** air tuyere, friction stir welding, welding tool, type of welded joint, welding machine, welding head.

## References

1. Kotlyshev R. R. Friction stir welding [Svarka treniem s peremeshivaniem]. Rostov-on-Don: Publishing House of DSTU, 2012. 137 p. (rus)

2. Kaplun L. I. Blast furnace installation and design: study letter [Ustrojstvo i proektirovanie domennyh pechej: uchebnoe posobie]. Ekaterinburg: UrFU, 2016. 219 p. (rus)

3. Statsenko V. N. Thermal processes during friction stir welding [Teplovye processy pri svarke treniem s peremeshivaniem]. Vladivostok: Publishing House of FEFU, 2022. 120 p. (rus)

4. Sotnikov A. L., Muhovatyj A. A., Orlov A. A. Classification of non-destructive testing methods for welded compounds from copper obtained by agitation friction welding [Klassifikaciya metodov nerazrushayushchego kontrolya svarnyh soedinenij iz medi, poluchennyh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. Svarka i Diagnostika. 2022. No. 3. Pp. 19–24. (rus)

5. Thomas W. M. Friction stir welding — process variants. Tokyo, Japan, 2007. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-process-variants-an-update-october-2007>. (date of treatment 01.03.2023).

6. Staines D. J. The simultaneous use of two or more friction stir welding tools. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-simultaneous-use-of-two-or-more-friction-stir-welding-tools-january-2005>. (date of treatment 01.03.2023).

7. Sederkvist L. Millennium Welding. Friction stir welding is used to weld copper containers with a wall thickness of 50 mm used to store radioactive waste in Sweden [Svarka na tsysacheletiya. Rotacionnaya svarka treniem primenyaetsya dlya zavarki mednyh kontejnerov s tolshchinoj stenki 50 mm, ispol'zuemyh dlya hraneniya radioaktivnyh othodov Shvecii]. Svetsaren. 2005. No. 2. Pp. 31–33. (rus)

8. Polovtsev V. A., Makarov N. V., Shilo G. V. et al. Friction welding of aluminum liners of high-pressure metal composite cylinders [Frikcionnaya svarka alyuminiyevykh lajnerov metallokompozitnykh ballonov vysokogo davleniya]. Svarochnoe proizvodstvo. 2007. No. 12. Pp. 24–27. (rus)

9. Thomas W. M. Friction stir welding developments (April 2002). 6-th International Conference on Trends in Welding Research. USA, Georgia, 2002. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-developments-april-2002> (date of treatment 01.03.2023).

10. Consonni M. Processi di saldatura ad energia concentrata e fsw. Giornate Nazionali della Saldatura 4. Italy, Genova, 2007. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/italian/recenti-sviluppi-nei-processi-di-saldatura-ad-energia-concentrata-e-friction-stir-welding> (date of treatment 01.03.2023).

11. Brennan M. Friction stir welding expands its scope. URL: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/shopmanagement/friction-stir-welding-expands-its-scope> (date of treatment 01.03.2023).

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Сотников Алексей Леонидович**, д-р техн. наук, профессор каф. механического оборудования заводов черной металлургии

Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, РФ

**Пасечник Сергей Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент каф. цветной металлургии и конструкционных материалов

Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, РФ

**Вишневский Дмитрий Александрович**, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

**Орлов Андрей Андреевич**, ассистент каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

**Каленская Анна Васильевна**, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением и сварки Луганский государственный университет имени Владимира Даля,

г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ

**Муховатый Александр Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент каф. машиноведения

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,  
г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ