

УДК.621.791.793.

Семенов В. М., Кабацкий А. В., Красовский С. С., Хорошайло В. В.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДНИЩ РЕАКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

При изготовлении современной высокопроизводительной аппаратуры высокого давления в химической и нефтехимической промышленности в ряде случаев применяют двухслойные стали с хромистым защитным слоем. В качестве основного слоя обычно используют углеродистые или низколегированные стали: Ст. 3, 12ХМ, 15К, 20Н, 15М и др. с облицовочным слоем из хромоникелевой кислотостойкой стали [1–6].

Одним из основных технологических процессов производства данных изделий является сварка. Так, в процессе изготовления реакторов для каталитического риформинга с толстостенными корпусами из двухслойной стали при толщине металла свыше 40 мм продольные стыки обечаек сваривают обычно электрошлаковым способом. Однако, сварку днищ, имеющих форму полусфер, как правило, выполняют ручным или механизированным способом. Применяемый в некоторых случаях на производстве технологический процесс ручной дуговой сварки днищ реакторов непроизводителен. Для выполнения одного стыка толщиной 105 мм требуется наплавить 129 слоёв, осуществить четыре кантовки изделия, послейную зачистку шлака, проковку швов, удаление и последующую наплавку облицовочного слоя. Сварку осуществляют одновременно четыре сварщика в тяжелых условиях – при температуре изделия от 150 до 200°C.

Целью работы является исследование, разработка и внедрение технологии электрошлаковой сварки днищ реакторов. Для выполнения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- отработать технику выполнения электрошлаковой сварки криволинейных неповоротных стыков с наклоном к вертикали верхней и нижней части стыка на угол более 20°;
- спроектировать специальную оснастку для формирования поверхности шва со стороны облицовочного слоя и разработать конструкцию плавящегося мундштука;

Процесс электрошлаковой сварки прямолинейных стыков проволочными электродами биметаллических конструкций толщиной 20–30 мм довольно подробно исследован в работе [2]. Установлено, что биметаллические листы, полученные методом совместной горячей прокатки, имеют своеобразное строение вследствие диффузионных процессов, интенсивно протекающих при высоких температурах. На поверхности раздела двух сталей происходит накопление атомов углерода и хрома, в результате чего происходит образование карбидов хрома. При этом содержание углерода на границе раздела достигает 2 %, что в значительной степени затрудняет процесс сварки.

Металлографическими исследованиями поперечных макрошлифов обнаружены дефекты, условно названные «усами», толщиной в сечении 0,7–1 мм и протяженностью 5–10 мм [2, 5]. Начинаются они у облицовочного слоя и представляют собой хромистую сталь с различной степенью легирования хромом и углеродом. По данным спектрального анализа, содержание хрома в них составляет 7–10 %, а углерода – 1,5–2 %. Эти участки характеризуются закалёнными структурами с микротвёрдостью НВ 400. Автором [5] опробовано несколько вариантов электрошлаковой сварки:

1. Сварка без удаления облицовочного слоя, что приводит к появлению «усов».
2. Сварка с применением водоохлаждаемых ползунов с выступом. Этот процесс не оправдал себя ввиду того, что флюс, обладая большой жидкотекучестью, проникал под ползун. Застывая под ним, он отжимал ползун от кромок, что приводило к появлению дефектов.
3. Сварка со снятием облицовочного слоя. Этот процесс практически осуществим, но требует большой трудоёмкости, связанной с необходимостью удаления механическим путём широких полос облицовочного слоя и последующей наплавки в неудобном вертикальном положении.

Следует заметить, что данные [2, 5] не могли быть непосредственно использованы для выполнения настоящей работы, поскольку при изготовлении днищ реактора требовалось разработать технологию электрошлаковой сварки криволинейных стыков двухслойной стали толщиной 80–120 мм. В этой связи в настоящей работе был выбран вариант электрошлаковой сварки без удаления облицовочного слоя с использованием специальной формирующей оснастки. Такое решение позволило предупредить появление «усов», устранить операции по удалению и последующей наплавке облицовочного слоя, сократить расход сварочных материалов.

В качестве исходных материалов для проведения экспериментов использовали стандартную сварочную проволоку Св-04Х2М и флюс АН-8. С целью создания условий проведения экспериментов, близких к производственным условиям, при сварке использовали лепестки из стали 12ХМА+0Х18Н10Т, а также два лепестка эллиптической формы из стали Ст. 3.

Отработку техники выполнения электрошлаковой сварки криволинейного стыка осуществляли двумя способами: проволочными электродами и плавящимся мундштуком. Формирование поверхности швов при сварке проволочными электродами со стороны облицовочного слоя осуществляли подкладками, а с обратной стороны – ползуном. При сварке плавящимся мундштуком формирование поверхности швов осуществляли медными подкладками.

В процессе сварки лепестков из стали Ст. 3 и 12ХМ+0Х18Н10Т осуществлялись контроль качества поверхности швов, корректировка режимов, изучение деформаций. Для измерения деформации на свариваемые кромки изделия наносились керны на расстоянии 200 мм друг от друга. По длине стыка расстояние между ними составляло 600 мм. Базы (расстояние между кернами) измеряли до сварки, в процессе и после сварки. В процессе сварки при подходе уровня шлаковой ванны к каждой очередной точке (керну) производили измерения в этой точке и в точках на не заваренном участке шва. Абсолютную величину сближения кромок определяли как разницу измерений, произведенных до и после сварки.

После сварки один образец подвергали термической обработке – отпуску, другой – нормализации с отпуском. Режимы термической обработки сварных образцов принимали аналогичные заводским режимам.

В результате сварки лепестков разрабатывались технологические рекомендации по электрошлаковой сварке днищ, оснастка, приспособления.

Предусматривалось также внедрение разработанного технологического процесса при сварке опытно-промышленного днища реактора. Эксперименты по сварке проводили на заготовках лепестков, изготовленных из стали Ст. 3 и 12ХМА с использованием проволок Св-10Г2, Св-04Х2М, химический состав которых соответствовал техническим условиям и ГОСТ. Он приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

| Материал                       | Содержание элемента, % |      |      |       |       |      |      |      |
|--------------------------------|------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|
|                                | С                      | Mn   | Si   | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo   |
| Ст. 3                          | 0,18                   | 0,5  | 0,25 | 0,035 | 0,04  | –    | –    | –    |
| 12ХМ                           | 0,16                   | 0,55 | 0,23 | 0,012 | 0,02  | 1,07 | 0,06 | 0,44 |
| Проволока<br>Св-10Г2           | 0,10                   | 1,2  | 0,25 | 0,02  | 0,025 | 0,2  | 0,25 | –    |
| Проволока<br>Св-04Х2М          | 0,05                   | 0,52 | 0,24 | 0,012 | 0,018 | 2,1  | 0,16 | 0,5  |
| Плавящийся<br>мундштук<br>12ХМ | 0,16                   | 0,56 | 0,29 | 0,012 | 0,016 | 1,93 | 0,05 | 0,5  |

Электрошлаковую сварку проволочными электродами осуществляли аппаратом А - 535, электрошлаковую сварку плавящимся мундштуком – аппаратом А - 645. В качестве источника питания применяли трансформатор ТШС – 1000 – 3.

Основной трудностью электрошлаковой сварки криволинейных стыков (как и наклонных) является обеспечение равномерного провара кромок. Известно, что при сварке наклонных стыков провар нижних кромок бывает значительно меньше, чем верхних, хуже формирование поверхности шва. Это объясняется переливанием жидкого металла от верхних кромок к нижним.

При сварке использовали флюс АН – 8, химический состав которого приводится в табл. 2.

В настоящей работе опробованы два варианта электрошлаковой сварки криволинейных стыков – проволочными электродами и плавящимся мундштуком.

Таблица 2

## Химический состав флюса АН-8

| Содержание элемента, % |      |     |     |                                |                  |                  |                                |      |       |
|------------------------|------|-----|-----|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|
| SiO <sub>2</sub>       | MnO  | CaO | MgO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaF <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S    | P     |
| 34,0                   | 25,0 | 5,5 | 5,7 | 12                             | 15,0             | –                | 1,75                           | 0,01 | 0,012 |

Электрошлаковая сварка проволочными электродами. Сборку лепестков под электрошлаковую сварку производили с помощью скоб, две из которых приваривали со стороны облицовочного слоя, а одну со стороны стали 12ХМ (рис. 1). Лепестки собирали с зазорами: низ стыка – 38 мм, верх стыка – 40 мм. Сварку осуществляли аппаратом А - 535 на режиме: напряжение – 48–50 В; скорость подачи проволоки – 180 м/ч; количество проволок – 1 шт.; глубина шлаковой ванны – 40–50 мм; величина сухого вылета – 60–70 мм; скорость поперечных колебаний – 40 м/ч.



Рис. 1. Лепестки днища двухслойной стали 12ХМ + 0Х18Н10Т, подготовленные к ЭШС проволочным электродом

В процессе сварки изучали перемещение свариваемых кромок ( $\Delta$ ). Результаты измерений представлены в табл. 3. Анализ результатов показывает, что максимальная абсолютная величина перемещения кромок в средней и верхней части стыка не превышает 4 мм.

При осмотре поверхности швов не было обнаружено дефектов. Как и следовало ожидать, провар кромок нижней и верхней частей криволинейного стыка не одинаков. Как в верхней, так и в нижней части стыка провар нижней кромки несколько меньше, чем на верхней кромке. Чтобы обеспечить равномерный провар в процессе сварки, следует производить корректировку направления электродной проволоки. Необходимо при сварке без колебаний смещать электродную проволоку ближе к нижней кромке (рис. 2). При электрошлаковой сварке с поперечными колебаниями следует уменьшать подход электрода к формирующему устройству

у верхней кромки стыка и насколько возможно увеличивать подход к формирующему устройству у нижней кромки. Одним из радикальных путей получения равномерного провара является изменение времени остановки электродной проволоки у формирующих устройств. Для этого необходимо организовать временной цикл таким образом, чтобы время остановки электродной проволоки у формирующих устройств нижней кромки было больше.

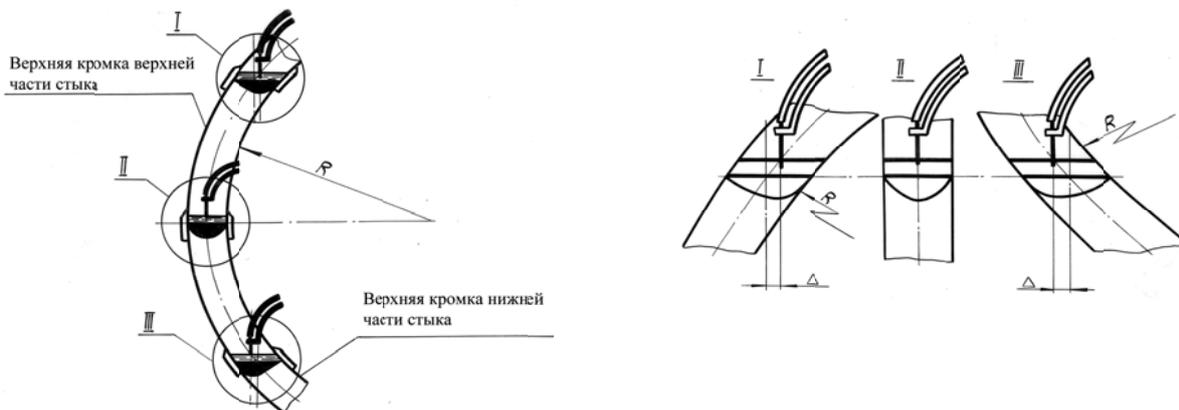


Рис. 2. Схема смещения электродной проволоки при сварке криволинейного неповоротного стыка

Таблица 3

Результаты определения деформаций при сварке лепестков днищ

| № точки | Расстояние между точками, мм |                                    |                        |                       |                       |                      | Перемещение кромок, Δ |              |
|---------|------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------|
|         | До сварки                    | При переходе шлаковой ванны к тчк. |                        |                       |                       |                      |                       | После сварки |
|         |                              | 1                                  | 2                      | 3                     | 4                     | 5                    |                       |              |
| 1       | <u>199,1</u><br>38,0         | <u>199,0</u><br>38,0               | –                      | –                     | –                     | –                    | 197,2                 | 1,9          |
| 2       | <u>198,5</u><br>39,25        | <u>199,0</u><br>39,5               | <u>198,0</u><br>38,5   | –                     | –                     | –                    | 197,0                 | 1,5          |
| 3       | <u>199,0</u><br>40,55        | <u>198,45</u><br>40,0              | <u>199,65</u><br>41,25 | <u>197,5</u><br>38,7  | –                     | –                    | 195,25                | 3,75         |
| 4       | <u>197,5</u><br>40,1         | <u>197,5</u><br>40,1               | <u>199,25</u><br>41,66 | <u>195,46</u><br>39,1 | <u>194,3</u><br>35,0  | –                    | 194,0                 | 3,5          |
| 5       | <u>197,1</u><br>40,5         | <u>197,85</u><br>40,6              | <u>198,66</u><br>41,4  | <u>197,4</u><br>40,7  | <u>196,75</u><br>39,1 | <u>194,7</u><br>36,0 | 193,4                 | 3,7          |

При отработке электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком сваривались две опытные заготовки лепестков из стали Ст. 3 эллиптического днища (рис. 3, а) и лепестки из стали 12ХМ + 0Х18Н10Т сферического днища (рис. 3, б). При сварке выбирались режимы, обеспечивающие равномерное проплавление кромок, конструкцию плавящегося мундштука и медных водоохлаждаемых подкладок, изучались деформации. Учитывая, что проплавление нижней кромки криволинейного стыка меньше, была выбрана конструкция мундштука, в верхней части которого трубка для подачи проволоки располагалась ближе к вогнутой стороне, в середине мундштука по центру и в нижней части трубка находилась ближе к выпуклой поверхности. Из-за сложности изготовления такого мундштука, связанной с вырезкой пластины по специальному шаблону, для сварки лепестков сферической формы (сталь 12ХМ)

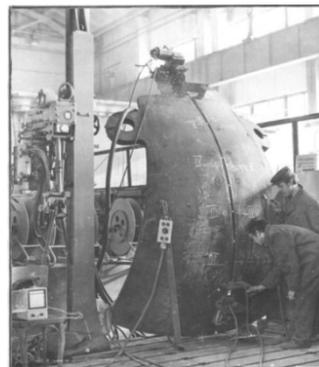
мундштук выполнялся более простой формы. Направляющая трубка в этом плавящемся мундштуке располагалась между прутками из стали Ст. 3 и смещалась в сторону вогнутой его части. Перед установкой плавящегося мундштука в разделку, к нему крепились изоляторы.

Для формирования поверхности швов применяли медные водоохлаждаемые подкладки, причём со стороны облицовочного слоя использовали подкладку с выступом, высотой, превышающей толщину облицовочного слоя на 5–6 мм. Это позволяет исключить операции удаления перед сваркой и последующую наплавку плакирующего слоя.

Разработанные особенности технологического процесса могут быть использованы заводами при электрошлаковой сварке криволинейных стыков изделий из двухслойных сталей.



а



б

Рис. 3. Процесс ЭШС лепестков стали 12ХМ + 0Х18Н10Т сферического днища:

а – собранные под сварку лепестки эллиптического днища и плавящийся мундштук с изоляторами; б – процесс электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны основные этапы технологического процесса электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком сферических лепестковых днищ реакторов из стали 12ХМ + 0Х18Н10Т:

а) выбраны режимы сварки для металла толщиной 80 мм: напряжение 40–43 В, скорость сварки 0,5–0,7 м/ч, глубина шлаковой ванны 45–50 мм, количество проволок – 1 шт.;

б) разработана конструкция плавящегося мундштука, обеспечивающая равномерный провар кромок изделия при сварке неповоротных криволинейных стыков;

в) разработаны формирующие устройства с выступом, исключающие операции удаления перед сваркой и последующую наплавку плакирующего слоя;

2. Составлены технологические рекомендации по электрошлаковой сварке днищ реакторов.

3. Разработанный технологический процесс может быть использован заводами при электрошлаковой сварке криволинейных стыков изделий из двухслойных сталей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В. М. Изготовление крупных конструкций с применением электрошлаковой сварки. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 228 с.
2. Ресурсосберегающие технологии при производстве сварных заготовок / В. М. Семенов, А. В. Жартовский, В. И. Кабацкий [и др.] – Краматорск : ДГМА, 2009. – 160 с.
3. Перспективы производства сварных толстостенных биметаллических корпусов сосудов высокого давления / Б. Е. Патон, А. Д. Чепурной, В. Я. Саенко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 1. – С. 30–39.
4. Герасименко И. Н. Сварка двухслойной стали с хромистым защитным слоем / И. Н. Герасименко – Машигиз, М., 1962. – 176 с.
5. Кривошея В. С. Образование при электрошлаковой сварке двухслойных сталей (Ст.3 + 08Х12, Ст.3 + 1Х18Н9Т) «усов», ослабляющих соединение / В. С. Кривошея // Сварочное производство, 1971. – № 9. – С. 37–39.
6. Оборудование, техника и технология электрошлаковой сварки неповоротных кольцевых стыков / Б. Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка, 2007. – № 7. – С. 25–28.

Статья поступила в редакцию 29.04.2015 г.