



ХАРАКТЕР ДИФФУЗИИ УГЛЕРОДА В ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ ПРЕССОВО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ СВАРКЕ

Л. Ю. ДЕМИДЕНКО, Н. А. ОНАЦКАЯ, инженеры
(Ин-т импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев)

Показано, что при прессово-термической электрогидроимпульсной сварке труб с трубными решетками в зоне контакта происходит образование двух полос — науглероженной со стороны трубы и обезуглероженной со стороны трубной решетки. Установлено, что причиной образования полос является направленная диффузия углерода, вызванная появлением в свариваемых элементах остаточных тангенциальных напряжений с различными знаками.

Ключевые слова: прессово-термическая электрогидроимпульсная сварка, сварка давлением, труба, трубная решетка, электрогидроимпульсная запрессовка, зона контакта, диффузия, остаточные тангенциальные напряжения, науглероженная и обезуглероженная полосы

Применение прессово-термической электрогидроимпульсной (ПТЭГ) сварки для соединения труб с трубными решетками позволяет повысить надежность и долговечность теплообменных аппаратов, работающих при больших давлениях и температурах в условиях термоциклирования, а также при вибрационных, ударных и других знакопеременных нагрузках [1]. Данный способ является разновидностью сварки давлением с подогревом, но отличается от других известных тем, что свариваемые детали в нагретом состоянии не подвергаются действию внешнего давления. Эту роль частично выполняет остаточное контактное давление, возникающее в результате запрессовки трубы в трубную решетку [2]. Отсюда следует, что процесс ПТЭГ сварки имеет определенные физические особенности, при которых создаются условия для образования сварных соединений по технологии, значительно отличающейся от традиционной технологии сварки металлов в твердой фазе.

Анализ отличий технологии выполнения сварных соединений сваркой давлением [3] от процесса ПТЭГ сварки показал, что упомянутые особенности главным образом связаны с использованием электрогидроимпульсной запрессовки [4]. В частности, это может быть обусловлено значительно большей, чем при диффузионной сварке, деформацией соединяемых поверхностей, а также возникновением между ними остаточного контактного давления. Согласно [3] при диффузионной сварке приложенное давление практически не приводит к макроскопической пластической деформации и изменению размеров свариваемых деталей. При ПТЭГ сварке вследствие запрессовки остаточное пластическое сжатие соединяемых поверхностей (раздача труб после выборки начального зазора) составляет несколько десятых долей миллиметра. Натяг, образовавшийся между трубой и трубной решеткой, по видимому, препятствует проникновению воздуха

между ними при нагреве, т. е. создаются условия, предотвращающие окисление свариваемых поверхностей, подобные имеющим место при автовакуумной сварке [5]. Определенную роль в образовании металлических связей между трубой и трубной решеткой при ПТЭГ сварке может играть то, что в результате запрессовки вблизи зоны контакта образуются остаточные тангенциальные напряжения противоположных знаков, а именно: в трубе — сжимающие, а в трубной решетке — растягивающие. Согласно [6] это является одним из факторов, стимулирующим диффузионные процессы. После запрессовки и нагрева до температуры сварки при отсутствии внешнего давления становится возможной достаточно интенсивная диффузия атомов через границу соединения.

Целью настоящей работы являлось установление характера диффузии в зоне контакта труб с трубными решетками при ПТЭГ сварке с учетом особенностей распределения остаточных напряжений.

С помощью металлографических исследований зоны соединения труба — трубная решетка из низкоуглеродистой стали Ст3, выполненного ПТЭГ сваркой после отжига при температуре $T_{отж} = 900$ °С в течение 35 мин, было выявлено, что вблизи границы соединения со стороны трубы образуется науглероженная (перлитная) полоса шириной 18... 40 мкм,

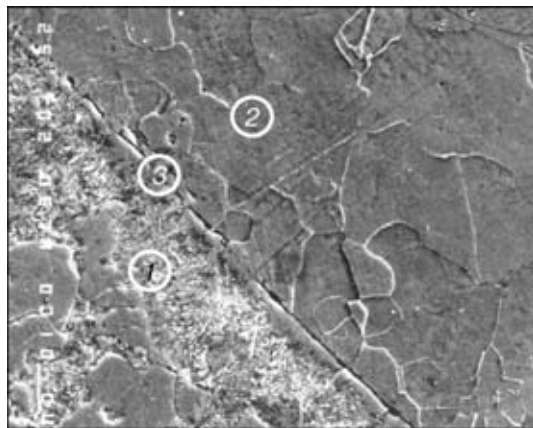


Рис. 1. Микроструктура ($\times 1000$) перлитной полосы в приконтактной зоне соединения труба — трубная решетка, выполненного ПТЭГ сваркой: 1 — труба с перлитной полосой; 2 — трубная решетка; 3 — граница соединения

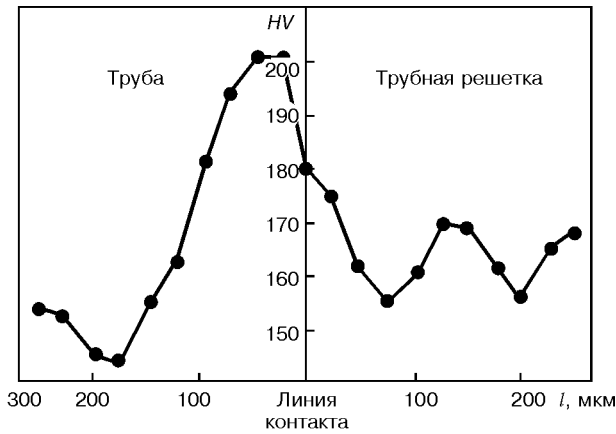


Рис. 2. Распределение микротвердости в зоне контакта и приконтактной зоне после отжига при $T_{отж} = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 60 мин

а в трубной решетке — относительно широкая (200... 400 мкм) обезуглероженная зона (рис. 1). Характерно, что такое явление наблюдается только при относительно высоких ($T_{отж} \geq 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах нагрева, при которых достаточно активно проходят процессы диффузии [7]. В этом случае в зоне контакта наблюдается формирование общих ферритных зерен, сопровождающееся прорастанием межзеренных границ. Отмеченное образование науглероженной и обезуглероженной полос подтверждается данными, полученными при измерении микротвердости в зоне контакта и приконтактных зонах сварных соединений (рис. 2). Результаты измерений свидетельствуют о перераспределении углерода несмотря на отсутствие различий его концентрации в исходном состоянии. Химический состав стали трубы следующий, %: углерода 0,18; марганца 0,52; кремния 0,06; состав стали трубной решетки — углерода 0,17; марганца 0,46; кремния 0,07.

Эффект диффузионного перераспределения углерода при традиционной сварке давлением описан в работе [8]. В этом случае подвижность углерода была вызвана разницей в концентрации легирующих элементов контактирующих сталей. При ПТЭГ сварке труб с трубными решетками причина перераспределения углерода очевидно иная — различие знаков остаточных тангенциальных напряжений, образующихся вследствие запрессовки в трубе и трубной решетке по границе соединения, а именно сжимающих — в трубе и растягивающих — в трубной решетке. При этом следует отметить, что в запрессованной трубе при относительно низких радиальных напряжениях тангенциальные остаточные достигают высоких значений, близких или даже равных пределу текучести (рис. 3). Как следует из [6], сжатие металла создает в нем вакансионное насыщение, в результате возникают диффузионные потоки из окружающих зон, направленные в сторону сжатия. Известно также, что скорость диффузии углерода на несколько порядков выше, чем у остальных элементов, в частности у железа [8]. Таким образом создаются предпосылки к повышению концентрации углерода в сжатом приграничном участке трубы, а именно к образованию перлитной полосы (рис. 2). С учетом изложенного выше можно говорить о наличии при ПТЭГ сварке дополнительного

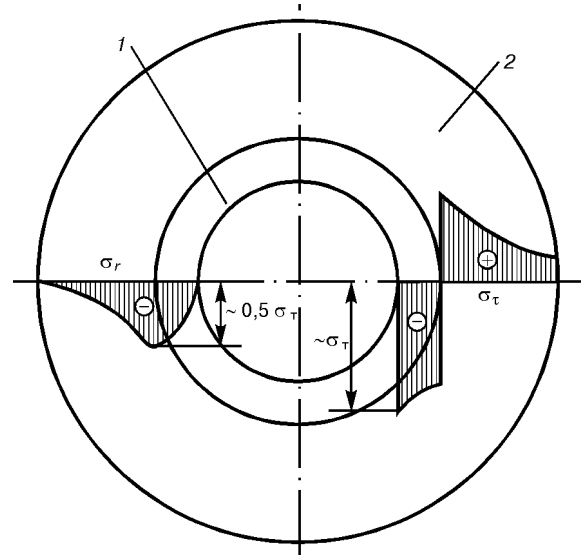


Рис. 3. Характерные эпюры остаточных радиальных σ_r и тангенциальных σ_t напряжений после электрогидроимпульсной запрессовки трубы (1) в трубную решетку (2)

фактора, который интенсифицирует кинетику процесса образования сварного соединения труба — трубная решетка при относительно низком контактном давлении.

Для подтверждения версии образования перлитной зоны в материале трубы и соответственно наличия еще одной особенности ПТЭГ сварки были проведены специальные исследования полученных этим способом соединений труб размером 16,0×2,5 мм с трубными решетками толщиной 60 мм (оба элемента из низкоуглеродистой стали 20). При этом использовалась промежуточная никелевая прослойка, нанесенная на трубу гальваническим способом. Целесообразность этих исследований обусловлена тем, что никель препятствует диффузии углерода [8], поэтому в данном случае перлитная полоса в трубе не должна образовываться. Для обеспечения достаточной активности диффузионных процессов температура термообработки была выбрана равной 900 °С при выдержке в течение 480 мин.

Металлографический и микронзондовый анализы проводили с помощью рентгеновского микроанализа

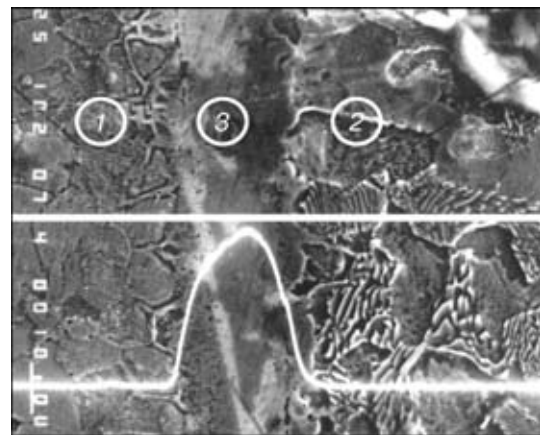


Рис. 4. Микроструктура ($\times 1000$) зоны контакта и приконтактной зоны, а также распределение никеля после ПТЭГ сварки с никелевой прослойкой (1 — труба; 2 — трубная решетка; 3 — никелевая прослойка)



затра ИСХА-733 фирмы «Джеол». Исследования зоны контакта дали ожидаемый результат, а именно: образования перлитной полосы вблизи соединения со стороны трубы не произошло, однако со стороны трубной решетки концентрация перлита несколько увеличилась по сравнению с исходной (рис. 4). Параллельно был проведен микрондальный анализ распределения никеля по линии, расположенной перпендикулярно границе соединения трубы с трубной решеткой (рис. 4), который зафиксировал отсутствие диффузии никеля из прослойки.

Представленные результаты показали, что при ПТЭГ сварке наблюдалась односторонняя направленная диффузия углерода через границу контакта из трубной решетки в трубу. Это обусловлено наличием в свариваемых деталях тангенциальных напряжений различных знаков. Следовательно, при ПТЭГ сварке имеет место дополнительный активизирующий фактор процесса образования сварного соединения, который компенсирует недостаток контактного давления.

It is shown that in press thermal electrohydropulsed tube-to-sheet welding the formation of two bands is occurred in the zone of contact, from a carburised side of the tube and decarburized side of the sheet. It was established that the formation of band is caused by a directed diffusion of carbon due to appearance of residual tangent stresses with different signs in the elements welded.

1. *Опара В. С., Демиденко Л. Ю.* Прессовотермическая сварка — радикальный путь повышения надежности теплообменных аппаратов // Тяж. машиностроение. — 1996. — № 10. — С. 23–26.
2. *Опара В. С., Юрченко Е. С., Демиденко Л. Ю.* Оценка роли высокотемпературного соударения в образовании сварного соединения трубы с трубной решеткой // Автомат. сварка. — 1992. — № 8. — С. 15–16.
3. *Казаков Н. Ф.* Диффузионная сварка материалов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1976. — 360 с.
4. *Мазуровский Б. Я.* Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. — Киев: Наук. думка, 1980. — 172 с.
5. *Финкельштейн М. Л.* Диффузионная сварка в жидких средах. — М.: Металлургия, 1978. — 64 с.
6. *Каракозов Э. С., Терновский А. П.* Сварка давлением: Диффузионная сварка. — М.: ВИНТИ, 1984. — С. 47–146. — (Итоги науки и техники. Сер. Сварка; Т. 16).
7. *Каракозов Э. С.* Соединение металла в твердой фазе. — М.: Металлургия, 1976. — 263 с.
8. *Лившиц Л. С., Хакимов А. Н.* Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1989. — 334 с.

Поступила в редакцию 16.10.2000,
в окончательном варианте 20.12.2000