



ПРЕССОВО-ТЕРМИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТРУБ С ТРУБНЫМИ РЕШЕТКАМИ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Л. Ю. ДЕМИДЕНКО, Н. А. ОНАЦКАЯ, Е. С. ЮРЧЕНКО, инженеры
(Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев)

По результатам прочностных испытаний и металлографических исследований проведена оценка качества соединений труб с трубными решетками, полученных с помощью прессово-термического электрогидроимпульсного процесса. Показано, что при этом на площади более 50 % всей контактной поверхности в компактных теплообменных аппаратах из высоколегированных сталей образуется металлическая связь.

Ключевые слова: прессово-термическая электрогидроимпульсная сварка, труба, трубная решетка, электрогидроимпульсная запрессовка, прочностные испытания, металлографические исследования, металлическая связь, качество

Развитие и совершенствование теплообменной аппаратуры идет по пути создания теплообменников высокой интенсивности, т. е. с плотной набивкой труб и тонкими межтрубными перемычками. Снижение массогабаритных показателей теплообменных аппаратов достигается уменьшением толщины трубной решетки и диаметра труб. Надежность работы такого оборудования может быть обеспечена использованием при их создании современных высокопрочных и коррозионноустойчивых материалов.

В отечественном энергомашиностроении находят широкое применение высоколегированные стали мартенситного и аустенитного классов, поскольку имеют необходимый комплекс свойств, обеспечивающих высокую работоспособность узлов энергетических установок [1]. Однако достаточно высокие свойства материалов лишь частично решают проблему их надежности.

Как показал опыт, при эксплуатации теплообменных аппаратов, работающих в условиях глубокого термоциклирования, преждевременно выходят из строя соединения труб с трубными решетками [2]. В этих условиях повысить стойкость соединений против разрушения можно путем обеспечения преобладания металлической связи, т. е. сварки по всей контактной поверхности [3].

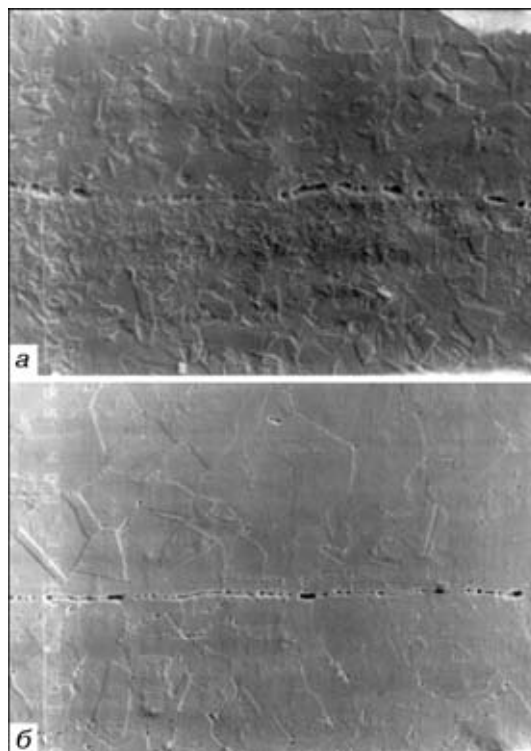
Одним из перспективных способов крепления труб с трубными решетками, позволяющим получить соединение с металлической связью сопрягаемых элементов практически по всей контактной поверхности, является прессово-термическая электрогидроимпульсная (ПТЭГ) сварка [4], сущность которой заключается в определенном сочетании электрогидроимпульсной (ЭГ) запрессовки [5] и термообработки. Оригинальность нового способа сварки труб с трубными решетками состоит в том, что при этом реализуется процесс, подобный процессу диффузионной сварки, но без приложения внешнего давления и защиты от окружающей среды. Последнее, согласно данным физических исследований [6], возможно благодаря образованию прессового соединения, поскольку возникновение сжимающих напряжений между трубой и трубной решеткой препятствует проникновению при нагреве между ними воздуха, т. е. создаются условия, предотвращающие окисление свариваемых поверхностей, аналогичные тем, которые имеют место при автовакуумной сварке [7]. Эффективность метода проверена на целом ряде соединений труб с трубными решетками из низкоуглеродистых, теплоустойчивых и жаропрочных сталей [4, 8].

Цель настоящей работы — исследование возможности получения сварного соединения труба–трубная решетка на большей части контактной поверхности в компактных теплообменных аппаратах из высоколегированных сталей. Экспериментальные исследования проводили на 19 трубных моделях с натурными трубами (10×1) и (8×0,8) мм, толщина трубных

решеток составляла соответственно 35 и 25 мм (разбивка отверстий в трубной решетке треугольная с шагом соответственно $13,0 \pm 0,1$ и $10,6 \pm 0,1$ мм). Трубы изготовлены из сталей 08X18H10T и 03X21H32M3B, трубные решетки — из сталей 12X18H10T и 08X16H11M3.

ПТЭГ сварку этих моделей проводили на режимах, предварительно отработанных на соответствующих однотрубных образцах [9]. В частности, ЭГ запрессовку осуществляли способом, обеспечивающим в соединении максимально возможное остаточное давление [5], термообработку моделей проводили в камерной электропечи сопротивления при температуре 950 °С.

Качество полученных соединений оценивали по результатам прочностных испытаний и данным металлографических исследований темплетов. Критерии качества — удельное усилие среза τ_c , методика определения которого представлена в работе [9], и показатель плотности Y , характеризующий (в %) относительную протяженность границы в поперечном сечении толщиной не более 1 мкм. Измерения последней проводили в 100 точках, примерно равномерно расположенных по длине окружности, с помощью рентгеновского микроанализатора JСХА-133 при 1000-кратном увеличении с использованием микронной ли-



Микроструктура зоны соединения труба–трубная решетка (×400): а — модель с трубой (10×1); б — 8 модель с трубой (8×0,8) мм



Результаты испытаний сварных соединений на срез в многотрубных моделях

| № соединения | Напряжение среза τ_c , МПа | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|-----------|-----------|------------------|----------------------------|-----------|------------------|
| | Модель с трубой (10X1) мм | | | | Модель с трубой (8X0,8) мм | | |
| | темплет 1 | темплет 2 | темплет 3 | среднее значение | темплет 1 | темплет 2 | среднее значение |
| 1 | 56 | 90 | 130 | 92 | 80 | 110 | 95 |
| 2 | 115 | 195 | 125 | 145 | 112 | 132 | 122 |
| 3 | 72 | 170 | 175 | 139 | 78 | 96 | 87 |
| 4 | 87 | 221 | 241 | 183 | 88 | 100 | 94 |
| 5 | 77 | 135 | 115 | 106 | 69 | 93 | 81 |
| 6 | 33 | 100 | 71 | 68 | 47 | 91 | 69 |
| 7 | 100 | 133 | 205 | 146 | 119 | 121 | 120 |
| 8 | 109 | 189 | 248 | 182 | 108 | 130 | 119 |
| 9 | 85 | 174 | 209 | 156 | 95 | 133 | 114 |
| 10 | 144 | 246 | 209 | 200 | 96 | 124 | 110 |
| 11 | 54 | 100 | 190 | 115 | 51 | 87 | 69 |
| 12 | 186 | 202 | 206 | 198 | 69 | 129 | 99 |
| 13 | 70 | 90 | 143 | 101 | 50 | 94 | 72 |
| 14 | 194 | 210 | 230 | 211 | 81 | 133 | 107 |
| 15 | 35 | 151 | 148 | 78 | 53 | 105 | 79 |
| 16 | 167 | 225 | 198 | 197 | 97 | 135 | 116 |
| 17 | 142 | 194 | 204 | 180 | 120 | 134 | 127 |
| 18 | 75 | 183 | 133 | 147 | 45 | 55 | 50 |
| 19 | 70 | 116 | 135 | 107 | 128 | 134 | 131 |

Примечание. Толщина темплетов 1–3 составляла 5 мм; их вырезку от внешнего торца трубной решетки проводили на удалении соответственно 5, 15, 25 мм.

нейки с ценой деления 0,5 мкм. Таким исследованиям в каждой модели подвергали все 19 соединений в плоскости, перпендикулярной к продольной оси модели, в срединной (по толщине трубной решетки) их части после соответствующей механической разрезки моделей. Согласно полученным результатам показатель плотности для соединений с трубой (8X0,8) мм составляет $Y = (56,7 \pm 5,8)\%$, а для соединений с трубой (10X1) мм граница оказалась более плотной: протяженность границы шириной менее 1 мкм составила $(72,3 \pm 12,4)\%$. Однако отмечались и незначительные участки с зазором 2... 4 мкм. На рисунке приведены характерные микроструктуры сварных соединений для исследуемых сочетаний материалов. Видно, что в зоне сварного соединения образуются общие зерна, внутри которых остается цепочка дефектов, ориентированных по первоначальной линии контактирования. Согласно [10] при повышении температуры термообработки до оптимального значения благодаря активации диффузионных процессов эти дефекты в значительной степени могут устраниться.

Результаты механических испытаний представлены в таблице. Анализ полученных результатов показал, что во всех соединениях обеих моделей на границе раздела труба–трубная решетка образовались металлические связи с прочностью на срез в среднем $\tau_c = (144,8 \pm 37,2)$ МПа — для соединений с трубой (10X1) мм и $\tau_c = (97,9 \pm 19,5)$ МПа — для соединений с трубой (8X0,8) мм. Удельная прочность τ_c большинства соединений в срединной части (темплеты 2, 3) достаточно высока

($\tau_c \geq 100$ МПа). В краевой зоне (темплет 1) отмечаются существенно меньшие значения напряжения среза и большая нестабильность данных. Это, очевидно, обусловлено неравномерностью раздачи трубы по длине трубной решетки, т. е. за счет торцевых потерь энергии раздача трубы на периферийных участках меньше, что приводит к снижению остаточного давления и как следствие к уменьшению τ_c .

На основе анализа всех представленных результатов можно отметить, что после ПТЭГ сварки в обеих многотрубных моделях образуются соединения трубы с трубной решеткой с преобладанием металлической связи на площади, не менее половины площади контактной поверхности. При этом невысокие температура и давление не изменяют свойства соединяемых элементов, что особенно важно для практики. Наличие же металлической связи между трубой и трубной решеткой обеспечивают высокую релаксационную стойкость соединения в процессе всего периода эксплуатации, снижение термического сопротивления перехода труба–отверстие трубной решетки, что в свою очередь резко снижает уровень термических напряжений в плоскости соединения. Это свидетельствует о достаточно больших технологических возможностях данного вида сварки труб с трубными решетками и соответственно его перспективности применительно к изготовлению компактных теплообменных аппаратов высокой интенсивности, используемых в судостроении.

Немаловажным преимуществом нового способа сварки является то, что при его промышленном применении не требуется дополнительных цехов, данный технологический процесс можно использовать в уже работающих производственных линиях при изготовлении ответственного теплообменного оборудования.

Таким образом, ПТЭГ сварка позволяет получить сварное соединение труба–трубная решетка практически по всей контактной поверхности в компактных теплообменных аппаратах из высоколегированных сталей. При этом многократно повышаются надежность и долговечность соединений труб с трубными решетками и оборудования в целом.

1. *Аполчина Н. М.* Металл в современных энергоустановках. — М.: Энергия, 1986. — 52 с.
2. *Промислов Л. А.* Отказы и работоспособность судовых теплообменников. — Л.: Судостроение, 1974. — 141 с.
3. *Влияние* вида сварных соединений труб с трубными досками на их стойкость против разрушения при термоциклировании // Г. М. Лесков, Н. Ф. Самусев, Ю. И. Котиков и др. // Автомат. сварка. — 1990. — № 4. — С. 21–23.
4. *Мазуровский Б. Я., Опара В. С., Демиденко Л. Ю.* Причины разрушения и пути повышения надежности коллекторов парогенераторов АЭС // Тяж. машиностроение. — 1994. — № 8. — С. 7–9.
5. *Мазуровский Б. Я.* Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. — Киев: Наук. думка, 1980. — 172 с.
6. *Демиденко Л. Ю., Опара В. С., Оцацкая Н. А.* Особенности взаимодействия контактных поверхностей при прессовотермической электрогидроимпульсной сварке // Тяж. машиностроение. — 2000. — № 7. — С. 37–38.
7. *Финкельштейн М. Л.* Диффузионная сварка в жидких средах. — М.: Металлургия, 1978. — 64 с.
8. *Опара В. С., Демиденко Л. Ю.* Прессовотермическая сварка — радикальный путь повышения надежности теплообменных аппаратов // Тяж. машиностроение. — 1996. — № 10. — С. 23–26.
9. *Демиденко Л. Ю., Юриченко Е. С.* Возможности прессовотермической электрогидроимпульсной сварки труб с трубными решетками // Там же. — 1992. — № 1. — С. 32–33.
10. *Казakov Н. Ф.* Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 359 с.

The quality of tube-to-tube sheet joints produced using a press-thermal electrohydropulsed process is estimated from the results of strength tests and metallographic examinations. It is shown that a metallic bond is formed at the area of more than 50 % of total contact surface in compact heat exchangers made from high-alloyed steels.

Поступила в редакцию 18.10.2002