

А.И. Жучков, Н.Т. Зиновьев, В.И. Курец, Э.Н. Таракановский, Г.П. Филатов

МНОГОИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЗАПРЕССОВКА ТРУБ В ТРУБНЫХ ДОСКАХ

*Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 2А, г. Томск, 634050, Россия*

Технология запрессовки труб электроразрядным способом, разработанным в ИИПТ Украинской АН, широко используется в практике производства теплообменных аппаратов [1]. Как правило, процесс запрессовки осуществляется однократным импульсом давления, генерируемым электровзрывом проволоочки, размещенной в специальном патроне, наполненном жидкостью. Эта технология предъявляет высокие требования к качеству поверхностей отверстий в трубной решетке и их размерам [2], поэтому ее использование в ремонтных работах на теплообменниках непосредственно на ТЭЦ затруднительно, так как эти условия, как правило, не могут быть выполнены. С учетом того, что традиционные (механические) методы запрессовки также не могут эффективно использоваться при нестандартных отверстиях в трубных решетках, проблема ремонта теплообменников актуальна.

Механизм запрессовки труб ударными нагрузками достаточно хорошо изучен [1, 3] и суть его заключается в создании гарантированного натяга по поверхности контакта трубы и трубной решетки за счет их совместного деформирования и последующей упругой разгрузки соединения. Этот процесс реализуется после выборки зазора между трубной решеткой и прессуемой трубой за счет ее пластической деформации. Энергию импульса (W_0) при однократном воздействии можно рассчитать из уравнения [2]:

$$\eta W_0 = A_{y.m.} \pi L_m (R_n^2 - R_s^2) + A_{y.p.} \pi L_p (R_{n.p.}^2 - R_0^2), \quad (1)$$

где η – коэффициент, учитывающий долю энергии импульса, идущую на создание давления внутри трубы ($\eta = 0,2 - 0,5$), $A_{y.m.}$ и $A_{y.p.}$ – удельное сопротивление деформации трубы и трубной решетки, L_m и L_p – длина деформируемой части трубы и трубной решетки, R_n и R_s – наружный и внутренний радиусы трубы, $R_{n.p.} = \Delta_{n.p.} + R_0$, $\Delta_{n.p.}$ – толщина зоны пластической деформации трубной решетки, R_0 – радиус отверстия в трубной решетке.

Все значения коэффициентов, входящих в уравнение (1), находятся по соответствующим номограммам [1, 2] для известных физико-механических свойств используемых материалов, размеров изделий и требований к прочности соединения. Исходные геометрические и прочностные характеристики трубы и трубной решетки, используемые в данной работе, представлены ниже. Результаты расчета необходимой энергии единичного импульса для стальной трубной решетки и латунной трубы по уравнению (1) для рабочего давления $2 \cdot 10^6$ Па и испытательного давления $4 \cdot 10^6$ Па показывают, что для указанных параметров соединения энергия единичного импульса должна быть не менее 6,7 кДж.

Запрессовка однократным импульсом с большой энергией имеет ряд отрицательных эффектов: зоны пластических и упругих деформаций могут достигать соседних отверстий в трубных решетках, искажая их форму и уменьшая прочность соединений; упрочнение материала трубы может вызвать увеличение ее упругой разгрузки и уменьшить плотность соединения и т.д. Нашей задачей является поиск возможностей получения качественных соединений при многоимпульсном воздействии с энергиями импульса на порядок ниже, чем используются при взрыве проволоочки, и без специальных патронов, то есть при стохастическом расположении канала разряда в рабочей зоне.

В работах [1,2] указывается на целесообразность использования нескольких импульсов для улучшения качества соединения. Так, двукратная запрессовка позволяет повысить плотность соеди-

нения, устранить влияние зазора между трубой и трубной решеткой, уменьшить влияние на геометрические размеры соседних отверстий в трубной решетке, а энергию вторичного импульса рекомендуют уменьшить в ~2 раза. Если предположить, что этот процесс реализуется при подаче большего числа импульсов, то, рассматривая рассчитанную выше энергию импульса (W_0) как необходимую суммарную энергию, передаваемую системе для получения требуемого качества соединения, можно оценить необходимое количество импульсов, зная их энергию (W_i) из выражения

$$N_i = W_0 / W_i. \quad (2)$$

В сводной табл. 1 представлены значения расчетного количества импульсов с различной энергией, необходимого для качественной запрессовки латунной трубы в стальной трубной решетке. Правомерность такого подхода необходимо проверить экспериментально. В экспериментах трубная решетка моделировалась толстостенной трубой из Ст.3 (предел текучести $2,1 \cdot 10^8$ Па), внешний диаметр которой составлял 33 мм, внутренний диаметр – 19,3 мм, длина – 90 мм. Вальцуемая труба (материал ЛО70-1, предел текучести 10^8 Па) имела внешний диаметр – 19 мм, толщину стенки 1 мм, длину образца – 180 мм. В работе использовался генератор импульсных токов с уровнем амплитуды импульса 30 кВ, энергия которого варьировалась от 200 до 2000 Дж путем изменения разрядной емкости, собираемой из малоиндуктивных конденсаторов типа ИК. Индуктивность разрядного контура составляла ~ 5 мкГн.

Таблица 1. Рекомендуемые параметры импульсов

| Показатель | Энергия единичного импульса, Дж | | | |
|--|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 540 | 900 | 1260 | 1620 |
| Диапазон возможного количества импульсов | 8–10 | 7–9 | 4–8 | 3–6 |
| Рекомендуемое количество импульсов, N_{opt} | 10 | 8 | 6 | 4 |
| Контролируемый диапазон размера d_2 , мм | 20,6–21,3 | 20,4–21,9 | 20,5–21,7 | 20,4–21,3 |
| Расчетное значение необходимого количества импульсов, $N_{расч}$ | 12 | 7 | 5 | 4 |
| Суммарная энергия, $N_{opt} W$, Дж | 5400 | 7200 | 7560 | 6480 |

В качестве рабочего органа использовалась электродная система, представленная на рис. 1. Электродная система состоит из потенциального электрода, изолированного полиэтиленовой трубкой, вокруг которой смонтированы 5 проволочных заземленных стержня из Ст.65 Г. В опытах латунная труба размещалась в стальной трубе так, чтобы один конец, моделирующий внешнюю часть бойлера, выступал на 10-12 мм за край стальной трубы. Противоположный конец латунной трубы соединялся с резиновым шлангом, через который в течение опыта непрерывно подавалась вода. Стык между трубами со стороны электродной системы герметизировали с целью исключения попадания воды в зазор. Вся система располагалась горизонтально. Конец потенциального электрода во всех опытах размещался на расстоянии 30 мм от внешнего среза стальной трубы.

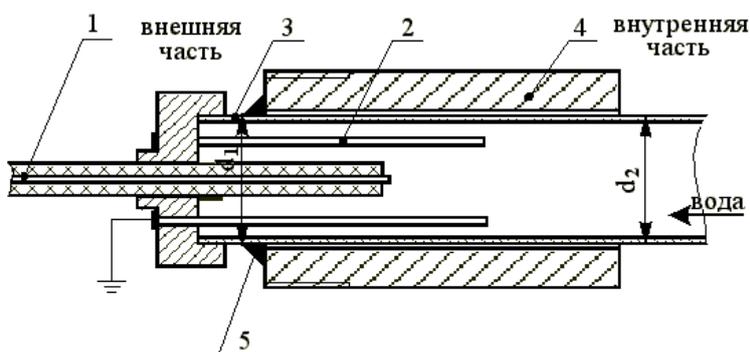


Рис. 1. Электродная система для электрогидравлической развальцовки: 1 – высоковольтный электрод; 2 – заземленные проволочки; 3 – латунная трубка; 4 – стальная труба; 5 – герметик.

В процессе экспериментов оценивались диаметры раздачи латунной трубы на обрезках стальной трубы – d_1 (внешний), d_2 (внутренний), после серии импульсов запрессованное соединение испытывалось на специальном стенде давлением $4 \cdot 10^6$ Па.

Металлографический анализ запрессованных соединений осуществлялся по стандартным методикам в трех сечениях образцов: в сечении, находящемся непосредственно в зоне разряда; на расстояниях 10 мм от каждого среза стальной трубы. Выявление микроструктур в стали проводили при травлении 4% раствором концентрированной азотной кислоты в этиловом спирте, а латунь протравливалась концентрированной азотной кислотой. Исследование микроструктуры проводили на микроскопе МИМ-8М. Оценку упрочнения металлов осуществляли путем испытаний их поперечного сечения на микротвердость на приборе ПМТ-3 алмазной пирамидой по ГОСТ 9450-60. Внешний вид образцов после запрессовки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид образца после запрессовки.

В табл. 2 представлены значения изменения диаметров латунной трубы при различном числе поданных импульсов и различных энергиях, запасаемых в генераторе. Как видно из представленных результатов, раздача латунной трубы на обрезках стальной трубы происходит постепенно. Так, при энергиях импульса 540 Дж заметное изменение диаметров происходит после 3–4 импульсов, а при энергии импульса 1620 Дж – 1–2 импульса, то есть этого числа импульсов достаточно, чтобы выбрать зазор между трубами. Испытания полученных соединений, проведенные в конце опытов, показали, что все образцы выдержали давление $4 \cdot 10^6$ Па.

Таблица 2. Изменение диаметров (d_1 и d_2) латунной трубки на обрезках стальной трубы (мм)

| Число импульсов N, шт | Энергия единичного импульса, Дж | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 540 | | 900 | | 1260 | | 1620 | |
| | d_1 мм | d_2 мм | d_1 мм | d_2 мм | d_1 мм | d_2 мм | d_1 мм | d_2 мм |
| 1 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 |
| 2 | 19,0 | 19,0 | 19,1 | 19,0 | 19,1 | 19,2 | 19,5 | 19,4 |
| 3 | 19,0 | 19,0 | 19,4 | 19,3 | 19,3 | 19,6 | 19,8 | 19,9 |
| 4 | 19,3 | 19,3 | 19,8 | 19,6 | 20,6 | 20,5 | 20,5 | 20,5 |
| 5 | 20,0 | 19,8 | 20,0 | 19,8 | 20,9 | 20,9 | 20,8 | 20,8 |
| 6 | 20,2 | 20,1 | 20,4 | 20,2 | 21,3 | 21,0 | 21,4 | 21,3 |
| 7 | 20,4 | 20,2 | 20,8 | 20,3 | 22,0 | 21,4 | 21,9 | 21,5 |
| 8 | 21,0 | 20,6 | 21,6 | 21,1 | 22,5 | 21,7 | 22,4 | 22,0 |
| 9 | 21,1 | 21,0 | 21,8 | 21,5 | 22,7 | 22,0 | 22,9 | 22,2 |
| 10 | 21,4 | 21,3 | 22,0 | 21,9 | 22,8 | 22,1 | | |

Следует отметить, что раздача свободных концов латунной трубки при ее запрессовке указывает на то, что основным источником давления, обеспечивающим деформацию, не может быть ударная волна, так как на таких расстояниях от канала разряда она практически отсутствует. Таким источником может выступать парогазовая полость, расширение которой обеспечивает необходимое давление жидкости в используемой системе.

Учитывая стохастический характер расположения траектории канала разряда в нашей электродной системе, необходимо оценить статистический разброс измеряемых величин (d_1 и d_2), косвенно характеризующих качество соединений.

Эту оценку провели на базе пяти опытов, выполненных в одинаковых условиях при энергии единичного импульса 1260 Дж, по методике Стьюдента [4]. Результаты анализа представлены в табл. 3. Как видно из представленных результатов, максимальный разброс значений d_1 и d_2 не превышает 6%, что необходимо учитывать при выборе числа подаваемых импульсов.

Таблица 3. Результаты статистического анализа

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| Число импульсов, N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Среднее значение d_1 | 19,00 | 19,24 | 19,80 | 20,03 | 20,30 | 20,80 | 21,5 | 21,90 | 22,10 | 22,6 |
| $\pm t_{\alpha, n-1} S_n / n^{1/2}$ | 0 | 0,24 | 0,72 | 0,80 | 0,8 | 0,6 | 0,53 | 0,85 | 0,7 | 0,7 |
| Разброс, % | 0 | 1,24 | 3,6 | 3,99 | 3,9 | 2,8 | 2,4 | 3,9 | 3,16 | 3,1 |
| Среднее значение d_2 | 19,00 | 19,28 | 19,8 | 20,1 | 20,46 | 20,8 | 21,1 | 21,4 | 21,6 | 22,5 |
| $\pm t_{\alpha, n-1} S_n / n^{1/2}$ | 0 | 0,28 | 0,56 | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 0,9 | 0,8 |
| Разброс, % | 0 | 1,4 | 2,8 | 4,47 | 5,37 | 4,3 | 5,23 | 4,2 | 4,16 | 3,5 |

При эксплуатации теплообменников наиболее слабым местом с точки зрения прочности труб является внутренний стык трубы и трубной решетки (d_2). Раздача трубы в этом стыке, согласно ГОСТ 23691-79, при запрессовке не должна превышать 22,8 мм. Проведенные опыты позволили определить минимальное количество импульсов с различной энергией, обеспечивающих качественную запрессовку соединения при минимальных значениях d_2 . Результаты исследований представлены в сводной табл. 1, в которой, кроме выбранных экспериментально параметров источника импульсов и режимов запрессовки, представлены значения диаметров d_1 и d_2 , позволяющих косвенно контролировать качество соединения, а также расчетные значения параметров и режимов источника импульсов, полученных из уравнений (1) и (2). Следует отметить хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений необходимого числа импульсов, обеспечивающих качество соединения.

Особый интерес представляет изучение возможности получения качественных соединений при существенном отклонении размеров и качества поверхности отверстий в трубных решетках от требуемых стандартов. Моделирование дефектов поверхности осуществляли нанесением риски по внутренней образующей поверхности цилиндра треугольного сечения глубиной 0,3 мм. Также вместо цилиндрического отверстия использовалось овальное отверстие с размером малой оси 19,2 мм и большой оси – 19,5 мм. Опыты проводились при энергии импульса 1260 Дж и подаче 6 импульсов. Все образцы, используемые в опытах, выдержали испытание давлением $4 \cdot 10^6$ Па.



Рис. 3. Микрофотография поперечного сечения границы запрессовки.

Микрофотография поперечного сечения границы запрессовки с риской представлена на рис. 3. Анализ границы соединения показал, что по всему периметру всех сечений латунь плотно прилегает к стали, повторяя все неровности на ее поверхности. В стали вблизи границы соединения, отмечается слой 10–30 мкм с более интенсивной травимостью, что может свидетельствовать о нали-

чий механических напряжений в этом слое. Текстуры деформации в изучаемых сечениях как в латуни, так и в стали не наблюдаются. Микротвердость латуни и стали определяли при нагрузке на алмазную пирамиду 100 гс продолжительностью не менее 8 с. Результаты испытаний показали, что микротвердость латуни на границе с сталью увеличивается на ~ 15% относительно остальной части образца и только в зоне формирования канала разряда. Микротвердость стали, определяемая на зернах феррита, практически не изменялась во всех изучаемых сечениях. Полученные результаты показывают, что деформация латунной трубки происходит постепенно в “щадящем” режиме, который не вызывает существенных изменений ее свойств, но позволяет выбрать все дефекты матрицы, а стальная труба испытывает только упругие деформации, обеспечивающие соответствующий натяг соединения при разгрузке.

Таким образом, предлагаемый нами метод запрессовки труб в трубных решетках при использовании нескольких импульсов с энергиями на порядок меньшими, чем применяемыми при запрессовке одним импульсом, и стохастическим формированием траектории канала разряда в рабочей зоне позволяет получать качественные соединения и может быть рекомендован для проведения ремонтных работ на теплообменниках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуровский В.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Киев, 1980.
2. Запрессовка труб с применением источников импульсного давления //ГОСТ 23691-79 ГОСТ 23693-79. М., 1979.
3. Крутин А.В., Соловьев В.А., Попов Г.С., Крыстев М.Р. Обработка металлов взрывом. М., 1991.
4. Зейдель А.И. Ошибки измерений физических величин. Л., 1974.

Поступила 10.05.2000

Summary

The process of brass tubes pressing in steel swages modeling tube slab heat exchangers under effect of some high-voltage impulses with different energy accumulated in generator is reviewed. It is shown, that it is possible to construct dense pressing the brass tube at pulse energies from 540 up to 1620 J. The proposed method of pressing in can be advised for repair of heat exchangers.

А.И. Шкурпело, В.В. Паршутин

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОЛЬГИ ИЗ ТРОЙНОГО СПЛАВА НМР-75

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

Введение

Экспериментальные исследования микротвердости образцов из фольги тройного сплава НМР-75 (75% Ni+15% Mo+10% Re в зависимости от температуры отжига показали некоторое сходство этой характеристики с соответствующей для субмикроструктурного палладия [1]. В области температуры отжига $T_{отж} = 800^{\circ}\text{C}$ наблюдается примерно двукратное снижение микротвердости (H_{μ}). В области $T_{отж} < 800^{\circ}\text{C}$ на зависимости H_{μ} от $T_{отж}$ с небольшим допущением можно считать значения микротвердости неизменными. На участке $T_{отж} > 800^{\circ}\text{C}$ происходит относительно небольшое, плавное изменение $H_{\mu}(T_{отж})$. С другой стороны, результаты анодных потенциодинамических исследований показали, что с ростом температуры отжига происходит уменьшение максимума плотности тока j_m и смещение j_m в сторону более положительного потенциала, а следовательно, и некоторое изменение угла наклона тафелевского участка зависимости $j = j(\Delta\varphi)$. Изменения по величине и по положению j_m , скорости возрастания плотности тока с увеличением потенциала и $T_{отж}$