

А.И. Жучков, В.И. Курец, М.А. Соловьев*, Э.Н. Таракановский, Г.П. Филатов

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТРУБЫ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ РАЗВАЛЬЦОВКЕ

НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете,

пр. Ленина, 2А, г. Томск, 634050, Россия

** Томский политехнический университет,*

пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

В ремонтных работах на теплообменных аппаратах основной проблемой является несоответствие стандартам обрабатываемых элементов. Так, отверстия в трубных досках имеют недопустимую овальность, вмятины и риски, зачастую проходящие через всю поверхность отверстия. В связи с этим при работах, связанных с развальцовкой, невозможно эффективно решать такие задачи с помощью традиционных механических методов. Поэтому одной из технологий, нашедшей свое применение в промышленности, является метод электроразрядной запрессовки труб в трубных досках теплообменных аппаратов.

Предложенный нами метод основан на многоимпульсном воздействии на сопрягаемые элементы с дозированной энергией импульса при стохастическом расположении траектории канала разряда в активной зоне.

Механизм запрессовки труб ударными нагрузками достаточно хорошо изучен [1], 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. Энергию импульса (W_0) при однократном воздействии (характерном для метода, связанного со взрывом проволоки) можно рассчитать из уравнения [1]:

$$\eta W_0 = A_{у.т.} \pi L_t (R_n^2 - R_b^2) + A_{у.р.} \pi L_p (R_{пл.р}^2 - R_0^2), \quad (1)$$

где η – коэффициент, учитывающий долю энергии импульса, идущей на создание давления внутри трубы ($\eta = 0,2 - 0,5$), $A_{у.т.}$ и $A_{у.р.}$ – удельное сопротивление деформации трубы и трубной решетки, L_t и L_p – длина деформируемой части трубы и трубной решетки, R_n и R_b – наружный и внутренний радиусы трубы, $R_{пл.р} = \Delta_{пл.р} + R_0$, $\Delta_{пл.р}$ – 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] для известных физико-механических свойств используемых материалов, размеров изделий и требований к прочности соединения. Результаты расчета необходимой энергии единичного импульса для стальной трубной решетки (диаметр отверстия 19,3 мм) и латунной трубы (диаметр 19 мм) 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. Рассматривая эту энергию как суммарную по известной методике [2] можно найти энергию единичного импульса и их количество, необходимые для получения качественного соединения.

При запрессовке труб в трубных досках требования к раздаче труб на внутренней части теплообменников зачастую включают условия, которые исключают ее увеличение [3]. Поэтому нами предложен метод регулирования раздачи трубки за трубной доской. В качестве элемента, ограничивающего деформацию, предложено применить преграду в виде цилиндрической вставки [4]. Она должна принимать на себя давление ударной волны и давление жидкости, вызванное расширением парогазовой полости, и надежно защищать стенку трубки от деформации.

Отличительной особенностью предложенной нами вставки было наличие центрального отверстия для прохода воды.

Основные достоинства метода: надежное ограничение зоны распространения давления, отсутствие расходных материалов, дешевизна, технологичность, простота конструкции.

Гашение энергии, выделенной в канале разряда, может осуществляться как за счет отражения волны давления от преграды, так и за счет диссипативных потерь [5]. В первом случае для того, чтобы отразилась максимальная часть падающей волны, необходимо, чтобы акустическая жесткость преграды была много больше акустической жесткости воды:

$$\rho_v c_v \ll \rho_c c_c. \quad (2)$$

Однако преграда из материала с очень большой акустической жесткостью и соответственно массой (например, металл) будет иметь большой момент инерции при воздействии волны давления и может разрушить фиксирующие его устройства или заземленный электрод.

Во втором случае, когда основной упор делается на гашение энергии волны давления за счет диссипативных потерь, необходимо, чтобы акустическая жесткость преграды была меньше акустической жесткости среды. Но в этом случае граничным условием будет механическая прочность материала, так как преграда может просто разрушиться после первого разряда. Поэтому в процессе экспериментов необходимо было подобрать материал преграды, обладающий комплексным набором этих качеств и эффективно гасящий энергию волны давления как за счет отражения и преломления, так и за счет диссипативных потерь.

Для изготовления вставки использовались как материалы с преобладанием диссипативных потерь (пенопласт, пористая резина, дерево), так и материалы, отражающие волну давления (винилпласт, полиэтилен, металл), вставка фиксировалась загнутыми заземленными электродами. Внешний вид электродной системы с использованием вставок представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид электродной системы со вставкой

Электродная система состоит из потенциального электрода, изолированного полиэтиленовой трубкой, вокруг которой смонтированы 4 проволочных заземленных стержня из стали Ст.65 Г. Для стабилизации месторасположения вставки предложено использовать часть заземленных стержней, которые загибались под углом 90° и фиксировали вставку с одной стороны, с другой стороны вставка фиксировалась оставшимися заземленными стержнями. 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 ЛЮ70-1, предел текучести 10^8 Па) имела внешний диаметр – 19 мм, толщина стенки – 1 мм, длина образца – 180 мм. 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. 2). 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.

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

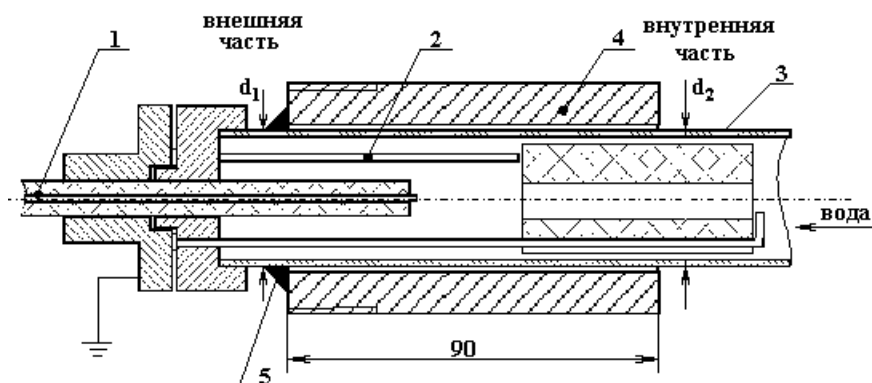


Рис.2. Расположение электродной системы в вальцуемой трубе
1 – потенциальный электрод; 2 – заземленный электрод; 3 – латунная труба;
4 – модель трубной доски; 5 – герметик

Таблица. Результаты эксперимента по выбору материала вставки

Число имп, шт.	1		2		3		4		5		6	
	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$
Пенопласт	19,0	19,0	Вставка полностью деформировалась									
Пористая резина	19,0	19,0	19,3	19,1	19,5	19,3	20,1	19,5	22,0	19,7		
Дерево (сосна)	19,0	19,0	19,8	19,1	20,1	19,5	Вставка раскололась					
Винипласт	19,0	19,0	19,0	19,1	Вставка раскололась							
Вакуумная резина	19,0	19,0	19,6	19,0	20,4	19,8	20,1	20,0				
Полиэтилен	19,2	19,0	19,8	19,0	20,4	19,1	22,7	19,2	23,1	19,2	24,0	19,3

Как видно из таблицы, пенопласт, дерево, винипласт не выдерживают уровня давления, инициируемого каналом электрического разряда, и разрушаются. Вставки из пористой резины, вакуумной резины, хотя и сохранили свои геометрические размеры, но вследствие высокого уровня деформации не смогли полностью предохранить трубку. Материалы данной группы не подходят для дальнейшей работы, так как они недостаточно прочные либо излишне пластичны.

Наилучшие результаты получены в случае полиэтиленовой вставки, которая эффективно защищает трубку от деформации на внутренней части трубной доски. Давление, создаваемое расширяющейся парогазовой полостью, деформирует и развальцовывает трубку внутри модели трубной доски. А вне трубной доски давление на стенку трубки ослаблено за счет многократных отражений в зазоре между вставкой и трубкой, а также диссипативных потерь в полиэтилене.

Определяющим был вопрос о длине вставки. Так, теоретически, чем она длиннее, тем большую поверхность вальцуемой трубки она защищает. Однако, при этом возникают конструктивные проблемы, связанные с фиксацией длинной вставки. Кроме того, перестановка электродной системы с длинной вставкой становится нетехнологичной и громоздкой.

Как показали эксперименты, при нашем расположении канала разряда (30 мм от внешней части трубной доски) заметная деформация трубки наблюдается на расстоянии, не превышающем 25 – 30 мм от внутреннего края трубной доски. Поэтому длина вставки с учетом простоты конструкции крепления, технологичности и экспериментальных данных выбрана 45 мм. Положение вставки относительно высоковольтного электрода ограничивалось необходимостью развальцевать трубку на всей толщине трубной доски.

При увеличении захода вставки внутрь трубной доски, деформация трубки на внутреннем срезе трубной доски увеличивается. Это связано с распространением давления через центральное отверстие вставки и воздействием его непосредственно на стенку трубки и через зазор между вставкой и трубкой. При этом ухудшается качество вальцовки в месте расположения вставки из-за потерь энергии, связанных с многократными отражениями и преломлениями волны давления в зазоре.

Уменьшение захода вставки в трубную доску также приводит к увеличению деформации трубки, что связано с уменьшением зоны гашения давления (величина перекрытия вставкой толщины трубной доски). Экспериментально установлено, что вставка длиной 45 мм должна входить в трубную доску на 10–15 мм. Применение вставки с таким расположением позволяет получить качественное соединение с величиной деформации трубки на внутреннем срезе трубной доски не более внутреннего диаметра отверстия в трубной доске.

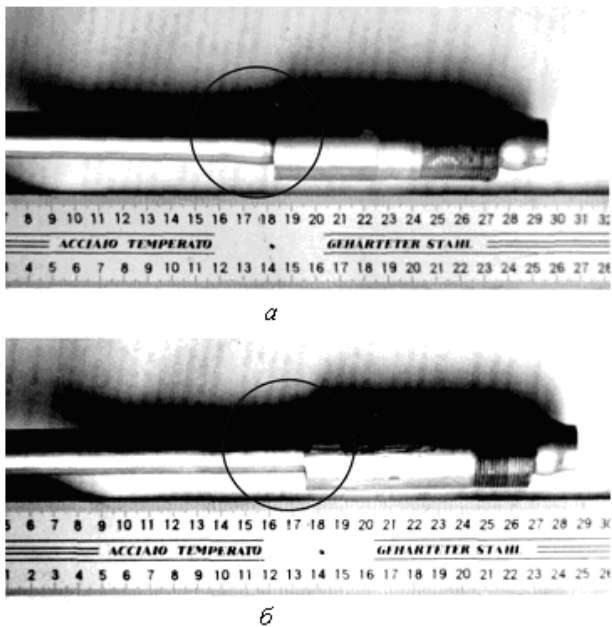


Рис.3. Внешний вид образцов развальцованных без применения вставки (а) и со вставкой (б)

образцов давлением $4 \cdot 10^6$ Па подтвердили это предположение. Внешний вид образцов развальцованных без вставки и с применением полиэтиленовой вставки приведен на рис. 3.

Так, диаметр трубки на внутреннем срезе трубной доски в течение 5 импульсов оставался не более диаметра отверстия в трубной доске. Вставка осталась неповрежденной, что позволяло использовать ее многократно. Кроме того, благодаря упругим свойствам полиэтилена проволоочные электроды, фиксирующие месторасположение вставки, не деформировались. Как было установлено ранее, в экспериментах без вставок вальцовочное соединение выдерживает испытательное давление $4 \cdot 10^6$ Па, если диаметр трубки на срезах трубной доски лежит в диапазоне 20,5–21,7 мм [2]. Поэтому при энергиях импульса 1260 Дж с использованием в качестве элемента, ограничивающего зону распространения волны давления, полиэтиленовой вставки с отверстием можно уменьшить число импульсов до 4, что соответствует снижению на 25–30% суммарной энергии, необходимой для получения качественного соединения. Испытания серии из пяти модельных

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуровский В.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Киев, 1980.
2. Жучков А.И., Зиновьев Н.Т., Курец В.И и др. Многоимпульсная электрогидравлическая запрессовка труб в трубных досках // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 77 – 81.
3. Запрессовка труб с применением источников импульсного давления //ГОСТ 23691-79, ГОСТ 23693-79, М., 1979.
4. Патент РФ № 2191085. Устройство для электрогидравлической развальцовки труб / Жучков А.И., Инамходжаев С.У., Курец В.И., Таракановский Э.Н., Филатов Г.П.
5. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Л., 1961.

Поступила 08.05.2003

Summary

Proposed method allows to limit the tube deformation on the inside cut of the tube plate. Limiting deformation is obtained applying special embedding that has central aperture for water flow. The best embedding position is determined as well as its geometrical size providing maximum pressure extinction formed when gas-vapor cavity is enlarged. Pressure wave energy is quenched because of dissipative losses inside the embedding material and due to losses derived from pressure wave reflection and refraction in the gap between the embedding and the tube side. The best material for embedding is polyethylene that not only protects tube side from deformation but also it is not destroyed and it is possible to use this embedding iteratively.