

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 2. С. 68–78
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 68–78

Научная статья
УДК 621.565.093

Технология производства и ремонта теплообменного оборудования с применением электровзрывного импульса

Е.Э. Вологин^{1✉}, А.А. Пыхалов^{1,2}, В.В. Потапов¹

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

²*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия*

✉*vologinee@istu.edu*

Аннотация. Теплообменные аппараты широко используются в авиации и энергетике в системах теплообеспечения. Одним из ответственных мест теплообменника является соединение между трубами и трубной решеткой. Традиционные технологии этого соединения (развальцовка, сварка, пайка) сложны, затратны и продолжительны по времени. В настоящей работе представлены исследование и реализация возможности использования для этого соединения электровзрывного импульса. Рассмотрены основные этапы технологии: изготовление электровзрывного картриджа, подготовка изделия и испытательной установки, проведение эксперимента, проверка качества соединения. Результаты исследования показывают, что использование электровзрывного импульса отвечает уровню традиционных методов соединения, при этом затраты на материалы значительно меньше.

Ключевые слова: теплообменник, труба, трубная решетка, импульсный источник давления, электровзрывной картридж

Для цитирования. Вологин Е.Э., Пыхалов А.А., Потапов В.В. Технология производства и ремонта теплообменного оборудования с применением электровзрывного импульса // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 2. С. 68–78. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=179326>

Original article

Technology of heat exchange equipment manufacturing and repair with electric-explosive impulse application

E.E. Vologin^{1✉}, A.A. Pykhalov^{1,2}, V.V. Potapov¹

¹*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

✉*vologinee@istu.edu*

Abstract. Heat exchangers gained wide acceptance in aviation and energetics in heat supply systems. The coupling between the pipes and the pipe grid is one of the critical places in the heat exchanger. Conventional technologies of this coupling (flaring, welding, soldering) are complex, costly and

time-consuming. This article presents the study and implementation of the possibility of applying an electric-explosive pulse for this kind of coupling. The authors considered the main stages of the said technology such as of an electric-explosive cartridge manufacturing, the product and test installation preparing, conducting an experiment and quality checking of the coupling. The results of the study revealed that application of the electric-explosive impulse meets the level of conventional coupling methods, whereas the cost of materials and time is by far less.

Keywords: heat exchanger, pipe, pipe grate, pulse pressure source, electric explosive cartridge

For citation. Vologin E.E., Pykhalov A.A., Potapov V.V. Technology of heat exchange equipment manufacturing and repair with electric-explosive impulse application. *Thermal processes in engineering*, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 68–78. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=179326>

Введение

Теплообмен между средами (пар, жидкость) для технических нужд осуществляется специальными аппаратами (теплообменниками), которые широко используются во многих энергоемких отраслях промышленности [1, 6], в частности они применяются на летательных аппаратах, как в системах жизнеобеспечения, так и силовых установках, например в системе отбора воздуха из компрессора газотурбинного двигателя. Спецификой теплообменной аппаратуры является ее работа при повышенных давлениях и температурах, а также при циклических нагрузках и в агрессивных средах. Наиболее ответственным узлом теплообменника, обеспечивающим его работоспособность и надежность, является соединение трубы с трубной решеткой (рис. 1, 2 [7]).

Фактически указанное соединение, технически и технологически является наиболее уязвимым местом работы изделия в целом, поскольку все нагрузки, которые воспринимает труба, передаются на ее соединение с трубной решеткой. Нарушение герметичности (плотности прилегания) в этих соединениях является основной причиной локальных отказов, связанных с отключением труб и выходом из строя аппаратов [2, 6].

Таким образом, представленное соединение должно обладать герметичностью, прочностью и коррозионной стойкостью. Особую роль здесь играет эффективность технологии производства и ремонта, позволяющей в минимальные сроки провести и обеспечить надежность и качество соединения (труба-решетка). Изучение этого процесса является актуальной задачей для работоспособности теплообменника.



Рис. 1. Место соединения трубы с трубной решеткой



Рис. 2. Испаритель азота двигателей РД107 и РД108

Традиционные технологии производства и ремонта представленного соединения в виде развальцовки, сварки и (или) пайки обеспечивают надежность работы соединения. Однако эти процессы технологически сложны, затратны и достаточно продолжительны по времени как при изготовлении теплообменных аппаратов, так и при их ремонте.

Целью статьи является исследование и реализация возможностей применения электровзрывного импульса в технологии ремонта (производства) соединения труб и трубной решетки в теплообменнике.

Развитие использования импульсного воздействия в технике берет начало в 1950–1970-е гг., в виде детонации взрывчатых веществ (ВВ), импульсных магнитных полей, расширения плазменного канала электрическим разрядом (предлагаемое). Общим принципом данных технологий является возможность деформировать детали с большой скоростью (порядка 1000 м/с), что создает условия для решения проблемы герметичности и качества представленного соединения в теплообменнике [3, 4, 5].

Традиционные методы крепления труб в трубных решетках

Для сравнения с предлагаемой технологией необходимо рассмотреть традиционные способы соединения, их преимущества и недостатки.

Механическая развальцовка трубы – это процесс изменения диаметра трубы путем ее расширения или сужения. Этот метод используется для соединения труб разного диаметра, создания фланцев, увеличения расхода жидкости или газа в трубопроводе и других целей [8, 9, 10].

Процесс развальцовки выполняется с помощью специального инструмента (рис. 3), который называется развальцовщиком. Он состоит из двух основных частей: ролика и матрицы. Ролик помещается внутри трубы, а матрица – снаружи. Затем развальцовщик механически расширяет трубу до нужного диаметра [8, 9, 10].

Преимущества механической развальцовки:

- увеличение диаметра трубы происходит без использования сварки;
- место соединения меньше подвержено коррозии;
- увеличивает пропускную способность трубы;

– ускоряет процесс монтажа трубы в трубной решетке [8, 9, 10].

При использовании механической развальцовки упрощается процесс и снижаются затраты на материалы и работу, улучшаются гидравлические свойства трубы.

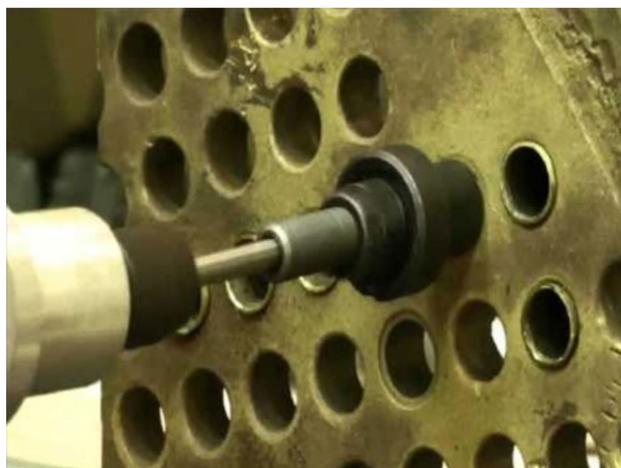


Рис. 3. Механическая развальцовка трубы

Недостатками механической развальцовки являются:

- наличие риска нерасчетной деформации трубы;
- необходимость специального оборудования;
- ограниченный выбор материалов и диапазон диаметров труб [8, 9, 10].

Сварное соединение – это соединение труб с помощью сварки [11–16].

Преимущества сварных соединений трубы с трубной решеткой:

- высокая прочность и возможность выдерживать большие нагрузки;
- не пропускают жидкости или газы;
- имеют более длительный по сравнению с развальцовкой срок службы [11, 12, 13].

Недостатками сварных соединений трубы с трубной решеткой являются:

- технология сварки требует определенных знаний, опыта и специального оборудования;
- имеется риск деформации трубы;
- высокая себестоимость;
- невозможно соединение двух разных материалов;
- требуется ужесточение правил безопасности при использовании [14, 15, 16].

Поскольку каждый из представленных традиционных способов соединения не лишен недостатков, то при внедрении новых способов должны рассматриваться лишь такие, которые являются более простыми и отвечающими схожему уровню надежности или превышающими его.

Одни из таких способов – крепление труб в трубных решетках энергией электровзрывного проводника (ЭВП). Однако для этого утверждения требуются специальные научные исследования [17–22].

Электрогидродинамический эффект впервые был получен в 1930-х гг. ученым Л.А. Юткиным при исследовании свойств высоковольтного разряда в жидкости [23].

Технология соединения труб в трубных решетках энергией электровзрывного проводника

Для изготовления труб и трубных решеток используются современные промышленные сплавы на основе алюминия, меди и стали (Al, Cu, Л68, Л70 и др.).

Основными этапами технологии ЭВП являются изготовление электровзрывного картриджа, подготовка изделия и испытательной установки, проведение эксперимента (физический процесс), проверка качества соединения.

Основой расчетов, используемых для реализации технологии ЭВП, выступают эмпирические методы, построенные на данных специального натурного эксперимента. Для его проведения используется экспериментальная установка, включающая в себя импульсный генератор (рис. 4, схема справа) и электровзрывной картридж (рис. 4, схема слева) специальной конструкции (рис. 4).

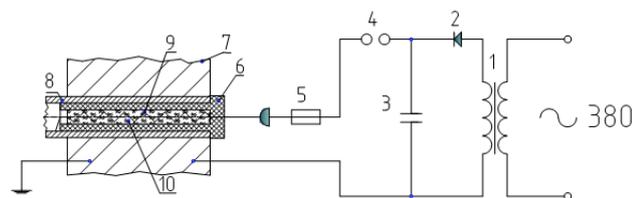


Рис. 4. Импульсный генератор: 1 – высоковольтный трансформатор; 2 – высоковольтный выпрямитель; 3 – батарея конденсаторов; 4 – разрядник; 5 – электрод; 6 – электровзрывной патрон; 7 – трубная решетка; 8 – труба; 9 – взрывающийся проводник; 10 – водная среда

Физический процесс крепления труб в трубных решетках, исходя из опыта отработки технологии ЭВП, заключается в следующем (рис. 4).

1. Подается напряжение на первичную обмотку высоковольтного трансформатора (1).

2. Через выпрямитель (2) происходит зарядка конденсатора (3).

3. Разрядником (4) задаются параметры заряда, накопленного в конденсаторе (3).

4. Разряд происходит на проводник (9), который расположен в электровзрывном картридже (6).

5. В результате разряда в жидкой среде картриджа (10) образуется электрогидродинамический импульс давления.

6. Импульс воздействует на стенки трубы (8) и деформирует ее.

Давление импульса определяется рядом параметров, основными из которых являются конструктивные особенности электровзрывного патрона и закон выделения энергии в проводнике и искре.

Закон выделения энергии, в свою очередь, определяется характером переходного процесса в разрядном контуре установки [24].

Виды и способы изготовления электровзрывных картриджей

Конструкция электровзрывного картриджа представляет собой полиэтиленовый патрон, заполненный водой (рис. 5, 6). Для инициирования электрического разряда в картридже размещается алюминиевый проводник, свернутый в спираль. Картридж размещается плотно к стенкам деформируемой трубы.

От конструкции картриджа зависит технологический эффект влияния ЭВП на профиль деформации труб. Это позволяет сконцентрировать определенным образом давление, оказываемое на рабочую поверхность трубы (рис. 7, 8).

Одними из важных параметров конструкции картриджа являются размеры длины торцевых частей патрона (от 5 до 25 мм), расстояние между пробками, которое снижает амплитуду волн импульсного давления, зависящего от расширяющегося плазменного канала [25], и др.

Конструкция корпуса патрона (рис. 6, 7, 8) была оптимизирована относительно комплекса проведенных испытаний с разработкой эскизов (рис. 9, 10) и изготовлением на 3D-принтере (рис. 11).

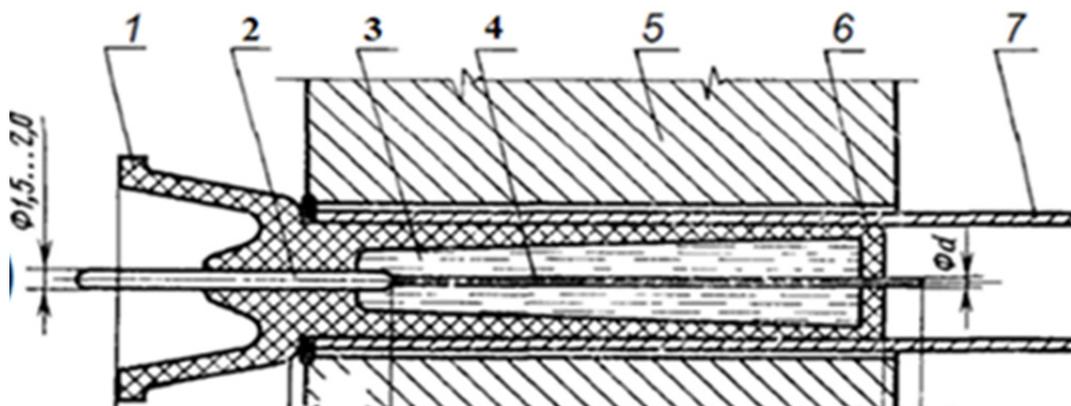


Рис. 5. Конструкция электровзрывного картриджа: 1 – корпус патрона; 2 – токопроводящая часть проводника; 3 – наполнитель (передающая среда); 4 – взрывающаяся часть проводника; 5 – трубная решетка; 6 – заглушка (торцевая пробка); 7 – труба

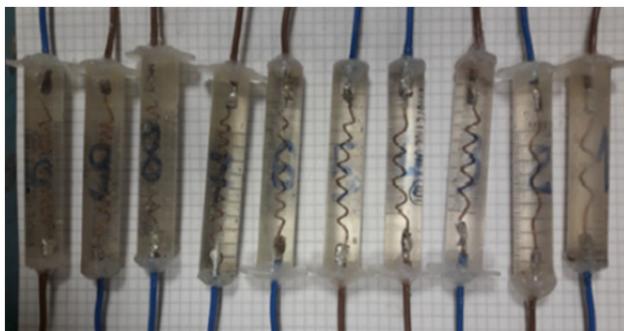


Рис. 6. Первые натурные образцы картриджа

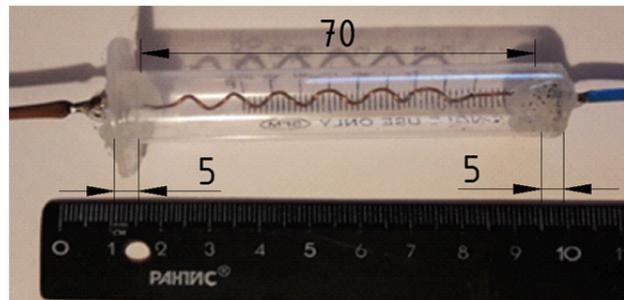


Рис. 7. Картридж до изменения конструкции

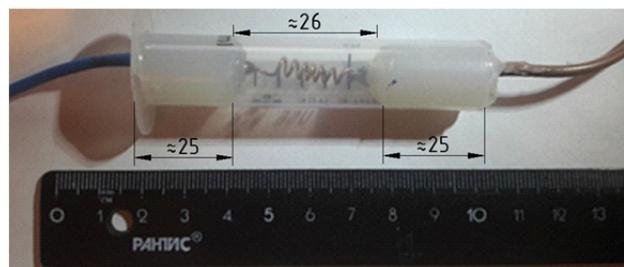


Рис. 8. Картридж после изменения конструкции

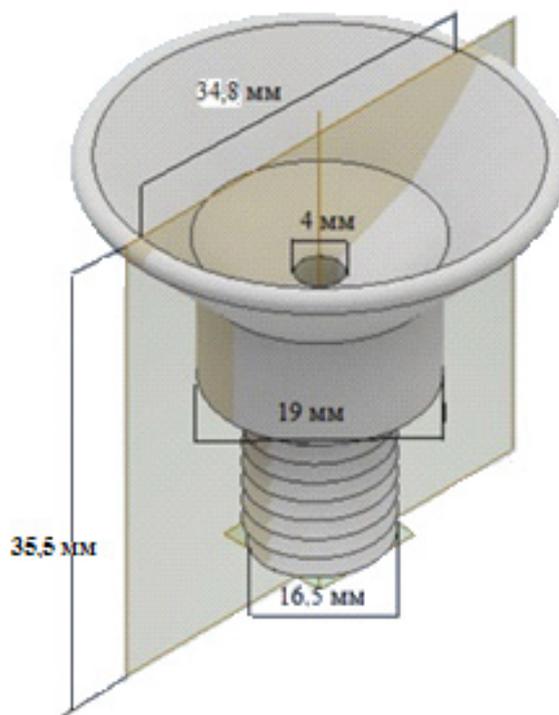


Рис. 9. Эскиз детали «Крышка»

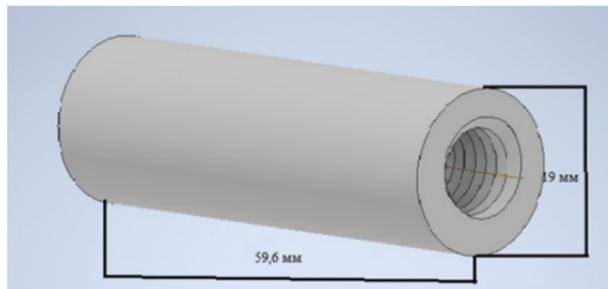


Рис. 10. Эскиз детали «Трубка»



Рис. 11. Опытный образец, сделанный на 3D-принтере

Исследования деформации стальной трубы после использования технологии ЭВП

Цель исследования состояла в том, чтобы получить соединение между стальной трубой и стальной трубной решеткой и проанализировать качество этого соединения.

Для этого эксперимента были изготовлены различные по конструкции картриджи и подготовлены стальные трубы и заготовки, имитирующие трубные решетки.

Для развальцовки трубы в трубной решетке по технологии ЭВП использовалась стальная заготовка трубы (рис. 12) толщиной стенки 4,0 мм с отверстием по центру $d_{отв} = 27$ мм. Размер данного отверстия взят из расчета того, чтобы исследовать возможность появления жесткого и герметичного соединения между трубой и трубной решеткой.

В заготовку трубы помещался патрон (с плотным прилеганием к стенкам трубы). Затем труба устанавливалась в заготовку, имитирующую трубную решетку, с соблюдением ГОСТа 23691-23693-79 «Соединение труб с трубными решетками и коллекторами теплообменных аппаратов» и ГОСТа Р 55601-2013 «Аппараты теплообменные и аппараты воздушного охлаждения. Крепления труб в трубных решет-

ках. Общие технические требования». Собранная конструкция (рис. 12) помещалась во взрывную камеру. На проводник подавалось высокое напряжение и происходил взрыв.

Деформация трубы протекала «плавно», с небольшим выходом трубы за пределы трубной решетки на величину не более 30 % от наружного диаметра трубы [26].

При визуальном осмотре испытанных стальных образцов была выявлена специфика технологии ЭВП и определены ее недостатки (рис. 13):

- вальцовка трубы с наружной стороны выполнена не до конца;
- с внутренней стороны наблюдалось раздутие трубы за трубной решеткой;
- профиль деформируемого участка трубы при креплении получает бочкообразную форму.

Представленные недостатки могут быть компенсированы правильным регулированием расположения и конструкцией картриджа. При этом характер распределения остаточного напряжения обеспечивает необходимый уровень крепление трубы в трубной решетке по герметичности и прочности соединения.

Сравнение методов соединения: механическая развальцовка и использование технологии ЭВП

В этом эксперименте (рис. 14) были использованы медные трубки и стальная трубная решетка. Сравнение показало, что метод с использованием электровзрывного проводника позволяет достигнуть тех же характеристик качества соединения, что и при использовании механического метода развальцовки.



Рис. 12. Фото собранной конструкции во взрывной камере

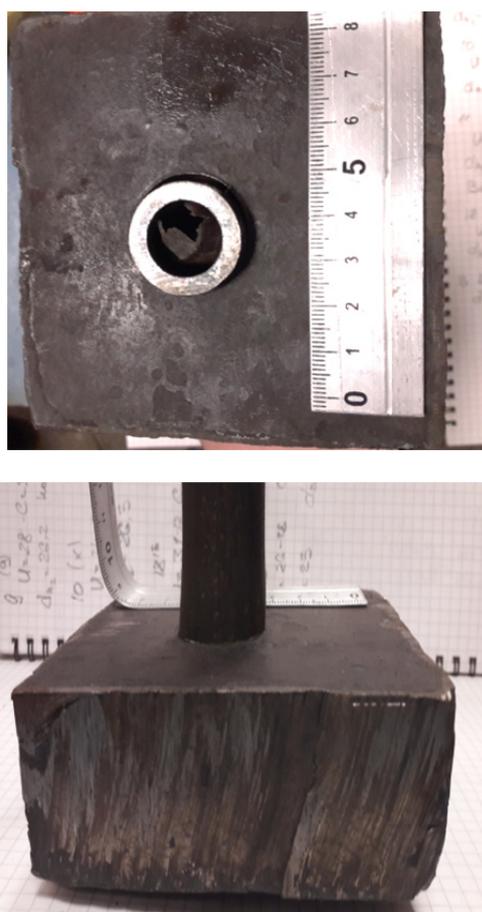


Рис. 13. Результаты вальцовки трубы в трубной решетке

Проверка качества соединения труба-решетка

Данная проверка включает в себя четыре этапа анализа качества сборки труб и трубных решеток:

- анализ состояния и соответствия электро-взрывных картриджей требованиям;
- внешний осмотр;
- испытания плотности (герметичности) соединения керосином;
- механические испытания.

Анализ состояния картриджей заключается в проверке правильности его сборки, целостности и правильном расположении в трубе.

Внешний осмотр проводится после испытания для выявления несдетонированных патронов, дефектов на внутренней поверхности труб и раздутия труб за пределы трубной решетки. Дефекты в виде трещин любых размеров, вмятин глубиной более величины допуска на толщину стенки трубы не допускаются.

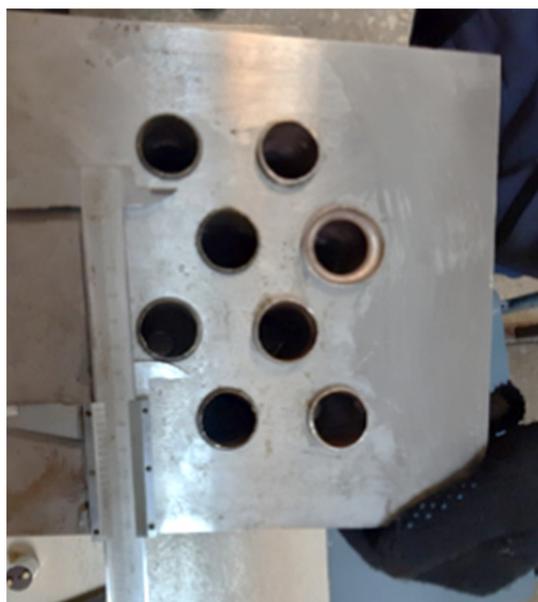


Рис. 14. Сравнение методов

Анализ соединения на герметичность проводится керосином согласно ГОСТу 18442-80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования». Это простой и эффективный метод контроля, обладающий высокой чувствительностью. Минимальный диаметр обнаружения неплотности прилегания поверхностей составляет 18×10^{-5} мм.

При испытании на непроницаемость (герметичность) наружный торец образца (рис. 15) со-

единения труба-решетка покрывался водной суспензией мела для подсушивания исследуемой области. Противоположная сторона соединения смачивалась керосином. После двухчасовой выдержки осуществлялся визуальный осмотр меловой поверхности. Наличие темных пятен свидетельствовало о пропуске в соединении. Все образцы, полученные с использованием технологии ЭВП, показали удовлетворительный результат.



Рис. 16. Крепления образца в разрывной машине

Механические испытания, проводимые на завершающем этапе, в виде опыта на растяжения (разрыв) соединения по ГОСТу 1497-2023 «Металлы. Методы испытаний на растяжение», проходили на разрывной машине ГРМ-2 при комнатной температуре в специальной оправке для удержания образцов (рис. 16).



Рис. 15. Развальцованные образцы при испытании керосином

Максимальная нагрузка, действующая на разрыв трубы, составила 9560 кгс. Разрушение происходило в месте соединения трубы с трубной решеткой. Это доказывает, что технология ЭВП выполняет необходимый уровень функциональности и является хорошей альтернативой традиционным технологиям.

Заключение

Результаты экспериментального исследования по изучению развальцовки трубы в трубной решетке при помощи технологии электровзрывного импульса для их соединения, показывают, что герметичность, жесткость и прочность соединения отвечают уровню традиционных методов в виде сварки и механической развальцовки. Наряду с этим в данной технологии выявлены преимущества перед ними, в частности сокращение временных и производственных затрат.

В ходе эксперимента были выявлены определенные недостатки исследуемого подхода: во время взрыва очень сложно отследить процесс деформации, а также термодинамический процесс; необходима разработка уточненной расчетной методики характеристик под разные патроны и изготовление самих патронов, под определенные соединения с индивидуальными параметрами труб и трубных решеток.

Одним из способов решения данных проблем, является создание математической модели рассмотренных объекта и процесса при помощи современных компьютерных технологий, построенных на основе численных методов и метода конечных элементов [27], реализованных на основе решения контактной задачи [28, 29, 30], механики деформируемого твердого тела [31].

Список источников

1. Головинцов А.Г., Юдаев Б.Н., Федотов Е.И. Техническая термодинамика и теплопередача. Москва: Машиностроение. 1970. 296 с.
2. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. Минск: Наука і тэхніка, 1990. 205 с.
3. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. Москва: Металлургия, 1978. 167 с.
4. Петушков В.Г. Применение взрыва в сварочной технике. Киев: Издательство «Наукова думка», 2005. 754 с.

5. **Мазуровский Б.Я.** Электрогидроимпульсная за-прессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Киев: Наукова Думка, 1980. 172 с.
6. **Бажан П.И., Каневец Г.И., Селиверстов В.М.** Справочник по теплообменным аппаратам. Москва: Машиностроение, 1989. 369 с.
7. **Клюева О. Г.** Разработка унифицированных компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов для жидкостных ракетных двигателей: автореферат: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Химки: НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко, 2008. 24 с.
8. **Степанов В.Г.** Основы технологии развальцовки труб в судовых теплообменных аппаратах. Ленинград, 1972. 189 с.
9. Инструмент для развальцовки труб: авторское свидетельство СССР / Ю.Г. Ермаков, В.С. Михайлов, В.А. Плюснин. № 220214, кл. В 21D 39/06, 1966.
10. **Вихман Г.Л., Круглов С.А.** Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. Москва: Машиностроение, 1978. 328 с.
11. **Китаев А.М., Губин А.Н.** Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. Москва: Машиностроение, 1972. 133 с.
12. **Анзин А.К., Бродский А.Я., Швецов Н.Т.** Слесарно-сварочные приспособления в самолетостроении. Москва: Оборонгиз, 1949. 312 с.
13. **Макаренко В.Д., Палий Р.В., Мухин М.Ю.** и др. Технологические свойства монтажной сварки трубопроводов. Москва: Недра-Бизнесцентр, 2001. 118 с.
14. **Юхин Н.А.** Дефекты сварных швов и соединений». Москва: Издательство «СОУЭЛО», 2007. 56 с.
15. **Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М.** Напряжения и деформации при сварке. Киев: Высшая школа, 1987. 245 с.
16. **Деев Г.Ф., Пацкевич И.Р.** Дефекты сварных швов. Киев: Издательство «Наукова думка», 1984. 208 с.
17. **Колмаков В.П., Гречнева М.В.** Исследование герметичного соединения труба-решетка выполненного сваркой взрывом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 3(27). С. 45–50.
18. **Дмитриев В.Г.** Сварка электрическим взрывом проводника соединений труба-решетка теплообменных аппаратов. Москва: ЦНИИТЭнефтехим. 1976. № 10. С. 9–11.
19. **Zhutchkov A.I., Zinoviev N.T., Filatov G.P.** Pressing of tubes in tube slabs using multiple electrical discharge in liquid // III International Conference "Plasma physics and plasma technology (Minsk, 18–22 September, 2000). Minsk. P. 558–561.
20. **Колмаков В.П., Дмитриев В.Г., Чеботнягин Л.М.** Соединение трубчатых деталей электрическим взрывом проводника: Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2011. 152 с.
21. **Мазуровский Б.Я.** Электрогидроимпульсная за-прессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Киев: Наукова Думка, 1980. 172 с.
22. **Чеботнягин Л.М.** Соединение трубчатых деталей импульсным давлением расширяющегося плазменного канала электрического разряда: дисс. ... канд. техн. наук: Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. 137 с.
23. **Юткин Л.А.** Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 253 с.
24. **Чеботнягин Л.М., Потапов В.В.** Некоторые закономерности скоростного деформирования металлической трубы с помощью электрического взрыва проводника. Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций // II Всероссийская конференция "Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций": тезисы докладов. Новосибирск: НГТУ, 2011. С. 127.
25. **Чеботнягин Л.М., Потапов В.В., Лопатин В.В.** Кинетика деформирования сплавов импульсным давлением электрического разряда // Известия Вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 1. С. 51–56.
26. **Постников В.А.** Контроль непроницаемости сварных и паяных соединений. Москва: Информ-электро, 1969. 40 с.
27. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 542 с.
28. **Пыхалов А.А.** Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: дисс. ... д-ра. техн. наук. Москва: Московский государственный авиационный институт, 2006. 405 с.
29. **Пыхалов А.А., Милов А.Е.** Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 192 с.
30. **Джонсон К.** Механика контактного взаимодействия. Москва: Мир, 1989. 510 с.
31. **Работнов Ю.Н.** Механика деформируемого твердого тела. Москва: Наука, 1988. 712 с.

References

1. **Golovintsov A.G., Yudaev B.N., Fedotov E.I.** Tehnicheskay termodynamika i teploperedacha [Technical thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 296 p.
2. **Zakharenko I.D.** Svarka metalov vzrivom [Welding of metals by explosion]. Minsk: Nayka i technika, 1990, 205 p.
3. **Kudinov V.M., Koroteev A.Ya.** Svarka vzrivom v metallurgii [Explosion welding in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 167 p.

4. **Petushkov V.G.** Primenenie vzriva v svarochnoi [The use of explosion in welding technology]. Kyiv: Naukova dumka, 2005, 754 p.
5. **Mazurovsky B.Ya.** Electroimpulsnay zapresovka trub v trubnih reshetkah teploobmenih apparatov [Electrohydroimpulse pressing of pipes in tube arrays of heat exchangers]. Kyiv: Naukova dumka, 1980, 172 p.
6. **Bazhan P.I., Kanevets G.I., Seliverstov V.M.** Spravochnik po teploobmenim aparatam [Handbook of heat exchangers]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 369 p.
7. **Klyueva O.G.** Razrabotka unifecirovannih kompaktnih plastinchito-rebristih teploobmennih apparatov dlya jitkostnih raketnih dvigatelei [Development of unified compact plate-finned heat exchangers for liquid rocket engines]. Autorefert PhD. thesis. Khimki, 2008, 24 p.
8. **Stepanov V.G.** Osnovi tehnologii razvalcovki trub v sydovih teploobmenih aparatah [Fundamentals of pipe flaring technology in marine heat exchangers]. Leningrad, 1972, 189 p.
9. **Ermakov Yu.G., Mikhailov V.S., Plyusnin V.A.** Instrument dlya razvalcovki trub [Pipe rolling tool]. USSR Copyright Certificate no. 220214, cl. B 21D 39/06, 1966.
10. **Vikhman G.L., Kruglov S.A.** Osnovi konstruktirovanniy apparatov i mashin neftepererabativaushih zavodov [Fundamentals of the design of devices and machines of oil refineries]. Moscow: Mechanical engineering, 1978, 328 p.
11. **Kitaev A.M., Gubin A.N.** Svarka i payka tonkocentnih truboprovodov [Welding and soldering of thin-walled pipelines]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 133 p.
12. **Anzin A.K., Brodsky A.Ya., Shvetskov N.T.** Slesarno-svarochnie prispособleniy v samoletostroeniy [Locksmith and welding devices in aircraft construction]. Moscow, Oborongiz, 1949, 312 p.
13. **Makarenko V.D., Paliy R.V., Mukhin M.Yu.** et al. Tehnologicheskie svoistva montajnoi svarki truboprovodov [Technological properties of installation welding of pipelines]. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2001, 118 p.
14. **Yukhin N.A.** Defecti svarnih shvov i soedin [Defects in welds and joints]. Moscow: Izdatel'stvo «SOUEH-LO», 2007, 56 p.
15. **Kasatkin B.S., Prokhorenko V.M., Chertov I.M.** Naprejenie i deformaciy pri svarke [Stresses and deformations during welding]. Kiev: Vysshaya shkola, 1987, 245 p.
16. **Deev G.F., Patskevich I.R.** Defecti svarnih shvov [Defects in welds]. Kyiv: Naukova dumka, 1984, 208 p.
17. **Kolmakov V.P., Grechneva M.V.** Isledovanie germetichnogo soedineniy truba-reshetka vipolnenogo svarkoj vzrivom [Investigation of a sealed pipe-grate connection made by explosion welding]. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2010, no. 3 (27), pp. 45–50.
18. **Dmitriev V.G.** Svarka elektricheskim vzrivom provodnika soedinenii truba-reshetka teploobmenih apparatov [Electric explosion welding of the conductor of the pipe-grid connections of heat exchangers]. Moscow: Tsniiteneftkhim, 1976, no. 10, pp. 9–11.
19. **Zhutchkov A.I., Zinoviev N.T., Filatov G.P.** Pressing of tubes in tube slabs using multiple electrical discharge in liquid. *III International Conference "Plasma physics and plasma technology" (Minsk, 18–22 September, 2000)*. Minsk, 2000, pp. 558–561.
20. **Kolmakov V.P., Dmitriev V.G., Chebotnyagin L.M.** Soedinenie trubchatih detalei elektricheskim vzrivom provodnika [Connection of tubular parts by electric explosion of the conductor]. Irkutsk, 2011, 152 p.
21. **Mazurovsky B.Ya.** Elektrogidroimpulsnay zapresovka trub v trubnih reshetkah teploobmenih apparatov [Electrohydroimpulse pressing of pipes in tube arrays of heat exchangers]. Kyiv: Naukova dumka, 1980, 172 p.
22. **Chebotnyagin L.M.** Soedinenie trubchatih detalei impulsnim davleniem rasshiraushegosya plazmenogo kanala elektricheskogo razryada [Connection of tubular parts by pulsed pressure of an expanding plasma channel of an electric discharge]. Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2014, 137 p.
23. **Yutkin L.A.** Elektrogidravlicheskii efekt i ego primenenie v promishlenosti [Electrohydraulic effect and its application in industry]. Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 253 p.
24. **Chebotnyagin L.M., Potapov V.V.** Nekotorie zakonomernosti skorostnogo deformirovaniya metallicheskoi trubi s pomoshu vzriva provodnika [Some patterns of high-speed deformation of a metal pipe by means of an electric explosion of a conductor]. *II Vserossiiskaya konferentsiya "Deformirovanie i razrushenie strukturno-neodnorodnykh sred i konstruksii"*: tezisy dokladov. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011, p. 127.
25. **Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Lopatin V.V.** Kinetika deformirovaniya splavov impulsnim davleniem elektricheskogo razryada [Kinetics of deformation of alloys by pulsed electric pressure]. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 51–56.
26. **Postnikov V.A.** Kontrol nepronicaemosti svarnih i payanah soedinenii [Control of the impermeability of welded and soldered joints]. Moscow: Informehlekto, 1969, 40 p.
27. **Zenkevich O.** Metod konechnih elementov v tehnikе [The finite element method in engineering]. Moscow: Mir, 1975, 542 p.
28. **Pykhalov A.A.** Kontaknaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornih rotorov turbomashin [The contact problem of static and dynamic analysis of prefabricated rotors of turbomachines]. Moscow: Moscow Aviation Institute, 2006, 405 p.

29. **Pykhalov A.A., Milov A.E.** Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornih rotorov turbomashin [The contact problem of static and dynamic analysis of prefabricated rotors of turbomachines]. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007, 192 p.
30. **Johnson K.** Mehanika kontaktnogovzaimodeistviya [Mechanics of contact interaction]. Moscow: Mir, 1989, 510 p.
31. **Rabotnov Yu.N.** Mehanika deformiruemogo tverdogo tela [Mechanics of a deformable solid]. Moscow: Nauka, 1988, 712 p.

Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted on 15.01.2024; approved after reviewing on 02.02.2024; accepted for publication on 26.02.2024.