ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОМБИНИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ С ТРУБНЫМИ РЕШЕТКАМИ

OPTIMAL GEOMETRIC DIMENSIONS DETERMINATION OF THE ELEMENTS OF THE ALTERNATIVE CONSTRUCTION OF COMBINED PIPE JOINTS WITH TUBE SHEETS

А. С. Токарев
A. S. Tokarev

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation

Р. Г. Ризванов
R. G. Rizvanov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation

Д. В. Каретников
D. V. Karetnikov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation

Д. Ш. Муликов
D. Sh. Mulikov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation

На сегодняшний день теплообменное оборудование, и в частности кожухотрубчатые теплообменные аппараты, находят широкое применение в нефтяной и смежных областях промышленности. Одним из наиболее ответственных узлов аппаратов данного типа является соединение труб с трубными решетками, которое изготавливается вальцовочным либо комбинированным с применением сварки, если к его прочности и плотности предъявляются особые требования.

В свою очередь, среди материалов, использующихся в условиях высоких температур и агрессивных сред, широкое применение находят жаропрочные хромистые и хромо-молибденовые стали мартенситного класса. Однако их использование при изготовлении трубных пучков с комбинированными соединениями по существующей технологии ограничено сложностью сборочно-сварочных операций и необходимостью проведения последующей термообработки, являющейся весьма затратной операцией.

Альтернативой дуговым способам сварки при изготовлении комбинированных соединений является ротационная сварка трением. Данный способ позволяет отказаться от необходимости проведения операций термообработки и уменьшить затрачиваемое на изготовление время, однако требует конструктивных изменений элементов соединения труб с трубными решетками.

Альтернативная конструкция соединения подразумевает использование третьего элемента — приварной втулки. В связи с этим встает вопрос о возможности ее размещения в ограниченном пространстве между трубами в реальном теплообменном аппарате.

В статье установлены ограничения для максимальной толщины стенки приварной втулки, обеспечивающей возможность размещения труб в трубных решетках в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55601-2013. Другой решаемой задачей была проверка технологической прочности нескольких типоразмеров приварных втулок, способных как удовлетворять требованиям по размещению труб в трубных решетках, так и выдерживать с точки зрения прочности термомеханическое воздействие цикла ротационной сварки трением.

Ключевые слова

кожухотрубчатый
теплообменный
аппарат,
комбинированное
соединение труб
с трубными
решетками,
трубный пучок,
ротационная сварка
трением,
энергосбережение

Для решения данной задачи было проведено моделирование термдеформационного воздействия цикла ротационной сварки трением на альтернативный вариант конструкции комбинированного соединения труб с трубными решетками.

В результате расчетов были получены поля эквивалентных напряжений и пластических деформаций. На основе этих данных сделаны выводы о технологической прочности разных типоразмеров приварных втулок и возможности их размещения в трубной решетке в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55601-2013.

Shell-and-tube heat exchangers are widely used in the oil and related industries for today. Tube-sheet joint is one of the most crucial part of such apparatus. It is manufactured by rolling or rolling with welding, if special requirements are imposed on strength and tightness. In turn, heat-resistant chromium and chrome-molybdenum martensitic steels are widely used in high temperature and corrosive environments.

However, their use in manufacture of the tube bundles with rolled and welded joints of the existing technology is limited by complexity of setting-up and welding operations and necessity for subsequent heat treatment, which are expensive operations.

Rotary friction welding is an alternative to arc welding methods in manufacture of rolled and welded joints. This method allows refusing the necessity for heat treatment operations and reducing the time spent on manufacture, but it requires constructive changes in elements of tube-sheet joint.

The alternative construction of joint implies the use of the third element – the welded bush. In this connection, the question of the possibility of its placement in a confined space between the tubes in a real heat exchanger arises.

The article specifies limitations for the maximum thickness of the wall of bush, which makes it possible to place tubes in tube-sheets in accordance with requirements of State Standard GOST R 55601-2013. Another task to be solved was testing of technological strength of welded bushes of several sizes that can meet the requirements for the placement of tubes in tube-sheets and withstand the thermal deformation effect of the rotary friction welding cycle.

To solve this problem, modeling of the thermal deformation impact of the rotary friction welding cycle on the alternative design of rolled and welded tube-sheet joint was carried out. As a result of the modeling, fields of equivalent stresses and plastic deformations were obtained. On the basis of these data, conclusions about technological strength of different sizes of welded bushes and the possibility of its placement in tubesheet in accordance with the requirements of State Standard GOST R 55601-2013 were drawn.

Key words

shell-and-tube heat exchange apparatus, rolled and welded tube-sheet joints, tube bundle, rotary friction welding, energy saving

Теплообменная аппаратура составляет весьма значительную часть технологического оборудования в нефтехимической и смежных отраслях промышленности. Удельный вес теплообменного оборудования на предприятиях нефтехимической и нефтяной промышленности составляет в среднем 50 % [1].

Наибольшее распространение среди прочих получили кожухотрубчатые теплообменные аппараты, так как этот тип теплообменников имеет высокую эффективность, надежность и обладает большой вариативностью конструктивного исполнения.

Важным составным элементом кожухотрубчатых теплообменников является трубный пучок, состоящий из теплообменных труб, трубных решеток и перегородок. Ресурс и надежность теплообменников данного типа во многом определяются аналогичными показателями соединений труб с трубными решетками [2], которые согласно ГОСТ Р 55601-2013 выполняются либо вальцовочными,

либо комбинированными с использованием сварки [3].

Комбинированные соединения применяются для аппаратов, требующих повышенной прочности и плотности соединений труб с трубной решеткой: в теплообменных аппаратах, работающих при высоких давлениях и температурах, или когда к теплообменной аппаратуре предъявляются особые требования, связанные с пожаро- или взрывобезопасностью, а также токсичностью или радиоактивностью рабочей среды [4].

При изготовлении оборудования, эксплуатирующегося в условиях высоких температур, агрессивных сред и высоких механических напряжений, широкое применение находят жаропрочные хромистые и хромомолибденовые стали мартенситного класса [5]. Данные стали характеризуются способностью длительное время отвечать эксплуатационным характеристикам, предъявляемым к оборудо-

ванию и его элементам, при сравнительно низкой себестоимости.

Однако изготовление сварного оборудования из этих сталей значительно затруднено по причине склонности данного класса сталей к закалке. Для предотвращения возникновения холодных трещин в процессе сварки необходимы предварительный и сопутствующий подогрев и последующая термообработка. Так, для стали 15Х5М температура подогрева составляет 300–350 °С, а термообработка производится при температуре 740–760 °С.

Указанные операции термической обработки являются не только труднореализуемыми, но и энергозатратными, что существенно увеличивает затраты предприятий-изготовителей теплообменного оборудования.

В результате на сегодняшний день применение сталей данного класса, в том числе 15Х5М, затруднено сложностью сборочно-сварочного процесса при изготовлении нефтеперерабатывающего и теплообменного оборудования с применением дуговых способов сварки.

Альтернативным способом получения комбинированных соединений является ротационная сварка трением. Однако ее применение требует конструктивного изменения соединений труб с трубными решетками (рисунок 1) [6].

1 — труба; 2 — трубная решетка; 3 — приварная втулка

Рисунок 1. Альтернативный вариант конструкции комбинированных соединений труб с трубными решетками

Данный способ соединения позволяет добиться уменьшения временных затрат на изготовление и/или ремонт из-за высокого уровня автоматизации процесса ротационной сварки трением [7], а также получить сварное соединение с прочностными свойствами, не уступающими основному металлу, без применения термических операций [8].

Особенностью технологического процесса получения комбинированных соединений труб с трубными решетками в исполнении, представленном на рисунке 1, является использование третьего элемента — приварной втулки, что связано с технологическими особенностями процесса ротационной сварки трением. В связи с этим встает вопрос о возможности ее размещения в ограниченном пространстве между трубами в реальном теплообменном аппарате (рисунок 2) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55601-2013, который регламентирует шаг размещения трубных отверстий в трубных решетках t и номинальный размер перемычки m [3].

Рисунок 2. Размещение труб в трубных решетках по вершинам равносторонних треугольников

Согласно этому документу, при номинальном наружном диаметре трубы $d_e = 25$ мм шаг размещения трубных отверстий t принимается равным 32 мм, при этом для толщины трубной решетки от 21 до 40 мм номинальный размер перемычки $m = t - d_p$ должен равняться не менее 6 мм [3].

Таким образом, максимальная толщина стенки приварной втулки будет равна

$$h = m/2 + S = 6/2 + 2,5 = 5,5 \text{ мм}, \quad (1)$$

где h — толщина стенки приварной втулки;

m — номинальный размер перемычки;

S — номинальная толщина стенки трубы.

Далее были заданы свойства материала трубы, эквивалентной втулке и приварной втулке. В качестве свойств материала были использованы данные для стали 15Х5М по ГОСТ 20072-74 и ГОСТ 550-75. Вводились значения теплоемкости, теплопроводности, коэффициента температурного расширения, коэффициента Пуассона, модуля упругости, задавались кривые деформирования металла при различных температурах [9].

Для имитации термомеханического воздействия ротационной сварки трением на металл прикладывались два вида нагрузок: тепловые на первом этапе и механические на втором этапе расчетов.

На первом этапе проведено решение задачи нестационарного теплообмена, которое позволило определить температурное поле в зоне соединения. В качестве внешнего воздействия в зону контакта приварной втулки с трубой и эквивалентной втулкой приложена температура, равная 1300 °С [10].

Температурное поле, рассчитанное на первом этапе решения (рисунок 6), прикладывалось к узлам структурных элементов в качестве нагрузки на втором этапе. Также в качестве нагрузки прикладывалось осевое давление к торцу приварной втулки, равное 70 МПа и действующее 2 с [10].

Для ограничения перемещений и поворотов соединения были также приложены граничные условия (ограничение перемещений) к наружным граням трубы и эквивалентной втулки (рисунок 7).

В результате расчетов получены поля эквивалентных напряжений (рисунки 8–11) и пластических деформаций (рисунки 12, 13) для соединений труб с эквивалентной втулкой и отдельно для приварных втулок в условиях, имитирующих состояние металла непосредственно после процесса ротационной сварки трением.

Рисунок 6. Температурное поле, полученное на первом этапе расчетов

Рисунок 7. Нагрузки и граничные условия на втором этапе расчетов

Рисунок 8. Распределение эквивалентных напряжений в соединении трубы с эквивалентной втулкой с толщиной стенки приварной втулки 5,3 мм

Рисунок 9. Распределение эквивалентных напряжений в соединении трубы с эквивалентной втулкой с толщиной стенки приварной втулки 4,75 мм

Рисунок 10. Распределение эквивалентных напряжений в соединении трубы с эквивалентной втулкой с толщиной стенки приварной втулки 4,2 мм

а) толщина стенки 5,3 мм; б) толщина стенки 4,75 мм; в) толщина стенки 4,2 мм

Рисунок 11. Распределение эквивалентных напряжений в приварной втулке

а) толщина стенки 5,3 мм; б) толщина стенки 4,75 мм; в) толщина стенки 4,2 мм

Рисунок 12. Распределение пластических деформаций в соединении трубы с эквивалентной втулкой

а) толщина стенки 5,3 мм; б) толщина стенки 4,75 мм; в) толщина стенки 4,2 мм

Рисунок 13. Распределение пластических деформаций в приварной втулке

На рисунке 14 представлен график, отражающий зависимость величины максимальных пластических деформаций приварной втулки от толщины стенки.

Из графика видно, что максимальные пластические деформации в приварных втулках, возникающие в результате воздействия силовых факторов ротационной сварки трением, не превышают 5 %, следовательно, их технологическая прочность обеспечивается.

В результате анализа приведенных выше результатов можно сделать выводы, что с точки зрения технологической прочности процесс ротационной сварки трением выдерживает приварные втулки всех исследованных толщин.

Однако приварная втулка с толщиной стенки 5,3 мм позволяет получить соединения с более высоким уровнем эксплуатационных свойств. Из рисунка 12 видно, что пластические деформации равномерно распределены

по зоне контакта со свариваемым металлом, что благоприятствует пластическому деформированию тех объемов металла соединяемых деталей, которые расположены вблизи взаимодействующих поверхностей. Также в этом случае равномернее распределены и остаточные напряжения в зоне сварного соединения, меньше их концентрация, что должно положительно сказаться на ресурсе и коррозионной стойкости сварного соединения.

Распределение пластических деформаций и остаточных напряжений в зоне контакта приварных втулок с толщинами 4,75 и 4,2 мм смещено в область контакта с трубой, замечен их резкий скачок в области перехода от технологической проточки к зоне контакта с эквивалентной втулкой. В случае приварной втулки с толщиной стенки 4,2 мм, кроме прочего, контакт с эквивалентной втулкой происходит по малой площади, что негативно скажется на прочности соединения трубы с трубной решеткой.

Рисунок 14. Зависимость величины максимальных пластических деформаций в приварных втулках от толщины стенки

Выводы

1. Приварная втулка с толщиной стенки 5,3 мм обеспечивает возможность размещения труб в трубных решетках в соответствии с ГОСТ Р 55601-2013.
2. Приварная втулка указанного выше типоразмера обладает достаточной техно-

логической прочностью и может быть использована при изготовлении комбинированных соединений труб с трубными решетками с использованием операций ротационной сварки трением.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берлинер Ю.И., Балашов Ю.А. Технология химического и нефтяного аппаратостроения. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
2. Вихман Г.Л., Круглов С.А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. М.: Машиностроение, 1978. 328 с.
3. ГОСТ Р 55601-2013. Аппараты теплообменные и аппараты воздушного охлаждения. Крепление труб в

трубных решетках. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2014. 49 с.

4. Владимиров А.И., Перемячкин В.И. Ремонт аппаратуры нефтегазопереработки и нефтехимии. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. 120 с.

5. Зайнуллин Р.С. Ресурсосберегающие технологии в нефтехимическом аппаратостроении / Под ред. А.Г. Гумерова. Уфа, 2000. 348 с.

6. Пат. 2524468 Российская Федерация, МПК В 23 К 20/12, В23К31/02. Способ соединения узла «труба — трубная решетка» сваркой трением / Д.В. Каретников, Р.Г. Ризванов, А.М. Файрушин, Д.Ш. Муликов, А.Г. Баландина. 2012149757/02; заявл. 21.11.2012; опубл. 27.05.2014. Бюл. № 15.

7. Муликов Д.Ш., Ризванов Р.Г., Каретников Д.В., Файрушин А.М. Оценка возможности применения сварки трением для изготовления теплообменного оборудования из стали 15Х5М // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 47-51.

8. Муликов Д.Ш., Каретников Д.В., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М. Модернизация конструкции узла крепления труб к трубным решеткам кожухотрубчатых теплообменных аппаратов из стали 15Х5М // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 5. С. 39-410.

9. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.; под общей ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

10. Вилль В.И. Сварка металлов трением. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.

REFERENCES

1. Berliner Yu.I., Balashov Yu.A. *Tekhnologiya khimicheskogo i nefryanogo apparatostroeniya* [Technology of Chemical and Petroleum Machinery Construction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 256 p. (in Russ.).

2. Vikhman G.L., Kruglov S.A. *Osnovy konstruirovaniya apparatov i mashin neftepererabatyvayushchikh zavodov* [Fundamentals of Designing Apparatus and Machines for Oil Refineries]. Moscow, Mashinostroenie, 1978. 328 p. (in Russ.).

3. GOST R 55601-2013. *Apparaty teploobmennye i apparaty vozdušnogo okhlazhdeniya. Kreplenie trub v trubnykh reshetkakh. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard GOST R 55601-2013. Heat Exchanger

Apparatus and Air Cooling Apparatus. Tube Expanding in Tube-Sheets. General Technical Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 49 p. (in Russ.).

4. Vladimirov A.I., Peremyachkin V.I. *Remont apparatury neftegazopererabotki i neftekhimii* [Repair of Equipment for Oil and Gas Refining and Petrochemistry]. Moscow, Izd-vo «Nef't' i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina, 2001. 120 p. (in Russ.).

5. Zainullin R.S. *Resursosberegayushchie tekhnologii v neftekhimicheskom apparatostroenii* [Resource-Saving Technologies in Petrochemical Apparatus Construction]. Ufa, 2000. 348 p. (in Russ.).

6. Karetnikov D.V., Rizvanov R.G., Fairushin A.M., Mulikov D.Sh., Balandina A.G. *Sposob soedineniya uzla «truba — trubnaya reshetka» svarkoi treniem* [The Method of Pipe — Tube-Sheet Joining by Friction Welding]. Patent RF, No. 2524468, 2014. (in Russ.).

7. Mulikov D.Sh., Rizvanov R.G., Karetnikov D.V., Fairushin A.M. *Otsenka vozmozhnosti primeneniya svarki treniem dlya izgotovleniya teploobmennogo oborudovaniya iz stali 15Kh5M* [Evaluation of the Possibility of Friction Welding Usage for Heat Exchange Equipment Manufacturing of Steel 15Kh5M]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*, 2016, No. 3, pp. 47-51. (in Russ.).

8. Mulikov D.Sh., Karetnikov D.V., Rizvanov R.G., Fairushin A.M. *Modernizatsiya konstruksii uzla krepleniya trub k trubnym reshetkam kozhukhotrubchatykh teploobmennyykh apparatov iz stali 15Kh5M* [Upgrading Shell Tube Heat Exchanger's «Tube — Tube Plate» Unit's Construction 15CR5MO Steel]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, No. 5, pp. 398-410. (in Russ.).

9. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V. e.a. *Marochnik stalei i splovov* [Grade Guide of Steels and Alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p. (in Russ.).

10. Vill' V.I. *Svarka metallov treniem* [Welding of Metals by Friction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 176 p. (in Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Токарев А. С., магистрант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

A. S. Tokarev, Undergraduate Student of Technology of Oil Apparatus Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Каретников Д. В., кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

D. V. Karetnikov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technology of Oil Apparatus Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Ризванов Р. Г., доктор технических наук, профессор кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

R. G. Rizvanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Technology of Oil Apparatus Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Муликов Д. Ш., преподаватель кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

D. Sh. Mulikov, Lecturer of Technology of Oil Apparatus Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation