

Подоплелов Евгений Викторович,

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: uch_sovet@angtu.ru

Дементьев Анатолий Иванович,

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: dekan_tf@angtu.ru

Абрамов Артем Романович,

студент гр. ТМ-24, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

e-mail: artemabramov562@gmail.com

МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ

Podoplelov E.V., Dementev A.I., Abramov A.R.

METHODS OF APPLYING METALLIZED COATINGS ON THE SURFACES OF HEAT EXCHANGE PIPES

Аннотация. В работе рассмотрены методы нанесения металлизированных покрытий на поверхность теплообменных труб, разработан новый способ нанесения пористого металлизированного покрытия на наружную поверхность теплообменных труб методом электроискрового напыления.

Ключевые слова: метод электроискрового напыления, газотермическое напыление, электроэрозионное легирование.

Abstract. The paper discusses methods for applying metallized coatings to the surface of heat exchange pipes, and a new method for applying a porous metallized coating to the outer surface of heat exchange pipes using electrospark spraying has been developed.

Keywords: electric spark spraying, gas-thermal spraying, and electric erosion alloying.

В энергетике, химической промышленности и холодильной технике активно применяются процессы теплообмена при кипении. Они отличаются высокой интенсивностью и реализуются в различных установках и аппаратах (в том числе испарителях и парогенераторах). Как показывают исследования, существенно усилить такой теплообмен можно, нанося на теплообменные поверхности пористые металлизированные покрытия [1-3], благодаря которым температурное поле становится более равномерным, что многократно увеличивает интенсивность теплоотдачи при парообразовании. На практике это дает 5-10 кратный рост коэффициентов теплоотдачи при пузырьковом кипении и 2-4 кратное увеличение критических плотностей теплового потока (по сравнению с гладкими поверхностями), а также устойчивость теплообмена при давлениях ниже атмосферного.

В промышленности используются следующие методы нанесения металлизированных покрытий на поверхности теплообменных труб:

1. Метод электроискрового напыления. Этот способ позволяет создавать пористое как спиральное, так и сплошное металлизированное покрытие с развитой поверхностью, которое интенсифицирует теплообмен и защищает трубы от коррозии. Электроискровое напыление заключается в искровом напылении

исходного металла (например, цинка) на поверхность труб при помощи источника тока, создающего разность потенциалов между электродом и напыляемой поверхностью. При соприкосновении цинкового электрода с поверхностью происходит короткое замыкание, в результате чего электрод искроподобно расплавляется и сцепляется с поверхностью, образуя слой покрытия. В качестве электрода обычно используется цинковая проволока. Цинк обладает хорошими протекторными свойствами, что делает его подходящим материалом для защиты теплообменных труб.

2. Газотермическое напыление. Включает несколько методов, среди которых HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) и плазменное напыление. Оба метода применяются для нанесения защитных и функциональных покрытий на различные поверхности, включая трубы теплообменников, но имеют различия в технологиях, материалах и областях применения.

HVOF (высокоскоростное газоплазменное напыление) – метод, основанный на использовании сверхзвуковой струи продуктов сгорания горючих газов в смеси с кислородом. Порошковый материал подается в эту струю, нагревается, ускоряется до 600-800 м/с и наносится на поверхность. Таким способом получается покрытие с низкой пористостью (обычно менее 1 %).

При плазменном напылении в качестве источника тепла используется плазменная дуга. Электрическая дуга ионизирует газы (аргон, азот, водород и др.), образуя плазменную струю с температурой до 15000 °С и более. Порошковый материал подается в эту струю, плавится и распыляется на поверхности.

Эти методы позволяют получать плотные покрытия с хорошей адгезией, но они чаще применяются для нанесения сплошных, а не спиральных покрытий.

3. Электроэрозионное легирование (ЭЭЛ), которое может использоваться для создания шероховатости на поверхности труб. При этом методе материал анода (например, медь, бронза, сталь или графит) переносится на поверхность катода (трубы) искровым электрическим разрядом. Варьируя энергию разряда, можно изменять шероховатость поверхности и толщину покрытия.

Выбор метода нанесения металлизированных покрытий на поверхность теплообменных труб зависит от конкретных требований к покрытию, материала трубы, условий эксплуатации теплообменника и доступного оборудования. Однако, наибольшее распространение в промышленности получил метод электроискрового напыления.

В работе предложен новый способ нанесения покрытий на наружную поверхность теплообменных труб методом электроискрового напыления, реализуемый на станке (рисунок 1), отличающийся повышенной производительностью за счет возможности одновременной обработки 6-12 труб. Механизация процесса напыления реализована посредством использования зубчатого многопозиционного барабана. Привод барабана осуществляется реверсивным двигателем 12

через редуктор 11, клиноременную передачу 10, шестерню 13 и зубчатую пару 8 и 9. Шестерня 13 также передает вращение на ходовой винт 16, обеспечивающий продольное перемещение суппорта 15 и металлизационной головки 14. В конструкции станка интегрирован дифференциальный механизм, где солнечная шестерня 7 приводится в движение шестерней 8, а планетарные шестерни 6 – барабаном-водителем 5. В конструкции предусмотрено размещение осей планетарных шестерен 6 в корпусе барабана 5 с опорой на подшипники. Фиксация напыляемых труб 3 осуществляется посредством конусных зажимов 4, которые смонтированы на осях. Симметричное закрепление противоположных концов данных труб осуществляется посредством идентичных зажимов, расположенных в обойме 2. Кинематическая связь между осью этой обоймы и осью барабана реализуется за счет телескопического вала 1. Данное решение обеспечивает жесткую связь и синхронное вращение труб, а также позволяет регулировать межосевое расстояние в соответствии с длиной обрабатываемых изделий.

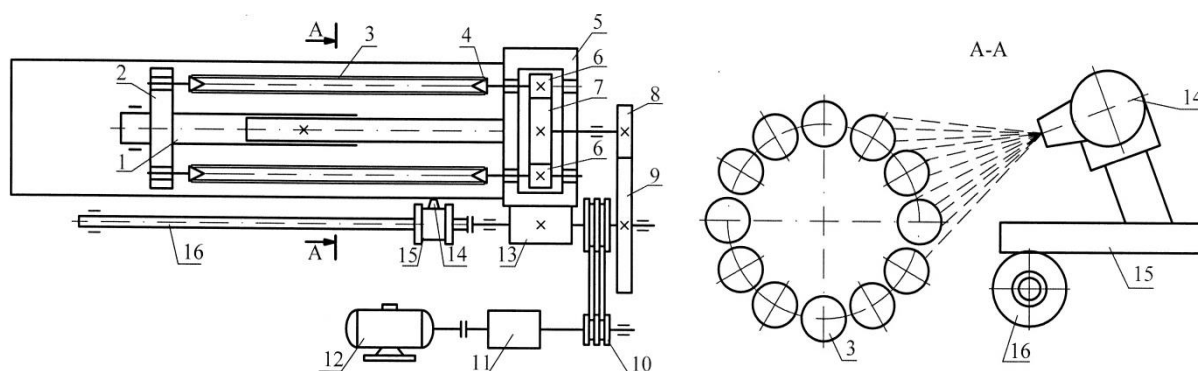


Рисунок 1 – Станок для электроискрового напыления покрытий на поверхность труб

Таким образом, новый способ нанесения пористых покрытий на наружную поверхность теплообменных труб позволит обеспечить высокую степень утилизации распыляемого металла. Это обусловлено одновременным присутствием нескольких труб в зоне напыления, что гарантирует практически полное взаимодействие металлизационной струи с их поверхностью. Потери металла, составляющие не более 1% (при зазорах между трубами до 8 мм), возникают лишь в моменты совпадения оси струи с межтрубными зазорами.

В работе выполнены расчеты коэффициентов теплоотдачи от теплоносителя в межтрубном пространстве для гладких и оребренных труб. В качестве исходных данных принималось: рабочая среда в межтрубном пространстве – вода, внутренний диаметр корпуса кожухотрубчатого теплообменника $D=1,4$ м, длина теплообменных труб $l=9$ м, диаметр труб $25 \times 2,5$ мм, число труб $n=1203$ шт. В расчетах принимался расход воды $V=116$ м³/ч, температура воды начальная $t_n=20$ °С, конечная – $t_k=40$ °С.

Для определения коэффициента теплоотдачи критерий Нуссельта при движении теплоносителя в межтрубном пространстве с сегментными перегородками, в случае если на поверхности труб отсутствует напыление, рассчитывался [2]:

$$Nu = 0,2 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,43},$$

где: Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

Коэффициент теплоотдачи определялся из уравнения:

$$\alpha_{\text{воды}} = \frac{\lambda}{d_H} \cdot Nu,$$

где: λ – коэффициент теплопроводности воды; d_H – наружный диаметр труб.

По результатам расчета коэффициент теплоотдачи для воды, движущейся между гладкими трубами в межтрубном пространстве, составил 1627 Вт/(м²·К).

При расчете коэффициента теплоотдачи для воды в случае напыленной поверхности труб использовалось уравнение, применимое для шахматного пучка труб, оребренных навивкой проволоочной спирали [3]:

$$Nu = 2,8 \cdot Re^{0,46} \left(\frac{d_H}{L} \right) \cdot \left(\frac{l_0}{h} \right),$$

где: $h=2$ мм – высота напыления; $L=10$ мм – шаг витков напыленной спирали; $l_0 = \pi \cdot d_H / z$ – шаг напыления; $z=40$ – число витков спирали.

В результате расчета коэффициент теплоотдачи для воды составил 3652 Вт/(м²·К). Таким образом, в случае напыления труб дискретным покрытием коэффициент теплоотдачи со стороны воды увеличивается в 2,2 раза.

Разработанная технология и соответствующее оборудование позволяют наносить на теплообменные трубы кожухотрубчатых аппаратов металлизированные покрытия различного типа – пористые, сплошные и спиральные, в зависимости от требований технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дементьев, А.И.** Математическая модель тепловых процессов в слое пористого металлического покрытия / А.И. Дементьев, Е.В. Подоплелов, Л.А. Антонов, Н.А. Корчевин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 2 (46). – С. 65-68.
2. **Дементьев, А.И.** Исследование теплообмена на пористой структуре / А.И. Дементьев, Е.В. Подоплелов // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 18.
3. **Дементьев, А.И.** Интенсификация процесса конденсации углеводородных соединений в теплообменном аппарате / А.И. Дементьев, Е.В. Подоплелов, А.Р. Соловьев // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета – 2016. – № 1. – С. 6-10.