

УДК 669

Щербин Сергей Анатольевич,

к.т.н., доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»,

ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Колесниченко Виктор Александрович,

обучающийся гр. ТМ-20-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический универси-

тет», e-mail: victor.kolesnichenko8@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И РАСЧЕТА МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ С ТЕПЛООБМЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Shcherbin S.A., Kolesnichenko V.A.

FEATURES OF APPLICATION AND CALCULATION OF MULTILAYER MATERIALS IN CHEMICAL EQUIPMENT WITH HEAT EXCHANGE DEVICES

Аннотация. В статье проанализированы особенности эксплуатации двухслойных сталей и биметаллов, указаны достоинства и недостатки этих конструкционных материалов. Перечислены основные проблемы, возникающие при сварке соединений из двухслойных сталей. Рассматривается влияние контактного термического сопротивления теплопередающей поверхности из многослойных материалов на интенсивность теплообмена. Предлагается подход к определению контактного термического сопротивления. Показана необходимость учета контактного термического сопротивления при проектировании химической аппаратуры с теплообменными устройствами из двухслойных сталей и биметаллов.

Ключевые слова: двухслойная сталь, биметалл, плакирующий слой, сварка, теплообмен, контактное термическое сопротивление.

Abstract. The article analyzes the features of the operation of double-layer steels and bimetals, the advantages and disadvantages of these structural materials are indicated. The main problems that are when welding joints made of double-layer steels are listed. The influence of the contact thermal resistance of a heat transfer surface made of multilayer materials on the intensity of heat exchange is considered. An approach to the determination of contact thermal resistance is proposed. The necessity of taking into account the contact thermal resistance in the design of chemical equipment with heat exchange devices made of double-layer steels and bimetals is shown.

Keywords: double-layer steel, bimetal, cladding layer, welding, heat exchange, contact thermal resistance.

Основным конструкционным материалом корпусов аппаратов, работающих под давлением и при высокой температуре в коррозионной среде, являются стали, отличающиеся высокой прочностью, коррозионной стойкостью и термостойкостью. При выборе марки стали следует учитывать, прежде всего, ее коррозионную стойкость в рабочей среде. Рекомендуются [1] применять углеродистые или легированные стали со скоростью коррозии не более 0,1 мм/год. Для экономии дефицитных и дорогостоящих легированных сталей допустимо использование двухслойных сталей (углеродистая сталь с защитным слоем из легированной стали). Возможно, также применение углеродистых сталей марок Ст3, 20К и т.п. с защитным покрытием из цветных металлов, пластмасс, эмали (если они обладают достаточной теп-

ловой и коррозионной стойкостью в контакте с заданной рабочей средой аппарата).

Двухслойные стали получают путем совместной горячей прокатки двух листов из стали основного и плакирующего слоя, которые при этом прочно свариваются между собой. Информация о толщине листов из двухслойной стали приведена в таблице 1 [2].

Поскольку одна часть элементов аппарата взаимодействует с рабочей средой (которая может быть агрессивной), а другая часть не взаимодействует – марки стали для этих групп элементов могут быть подобраны разными. Однако для исключения электрохимической коррозии в сварных швах следует избегать соединения элементов из разнородных материалов, находящихся в среде электролита. Поэтому, свариваемые друг с другом корпус и рубашку, включая опоры,

изготавливают из материала одной марки. Если таким материалом оказывается легированная сталь, то существенно возрастает стоимость аппарата. Коррозия не возникает в сварных швах, соединяющих оболочку корпуса из двухслойной стали (например, внутренний защитный (плакирующий) слой из легированной стали марок 12X18H10T, или 10X17H13M2T, или 06XH28МДТ, а наружный из углеродистой стали марок Ст3сп, 20К или 16ГС) с рубашкой из углеродистой стали. В этом случае сварка идет по углеродистой стали, электролит не имеет контакта со сварным швом, соединяющим два разнородных материала, а расход легированной стали сокращается. Для уменьшения коррозионного воздействия среды в нее, если это допустимо, могут добавляться ингибиторы (замедлители) коррозии. Контактную коррозию уменьшают подбором соответствующих материалов. Так, если оболочку из легированной стали соединить с рубашкой через промежуточный элемент рубашки, выполненный из той же стали, что и корпус, то контактная коррозия не будет угрожать корпусу аппарата.

Таблица 1 – Толщина листов из двухслойной стали

Общая толщина листа, мм	Толщина защитного слоя, мм		Минусовой допуск, мм
	нормальная	повышенная	
4	0,7	1,1	0,4
5	0,8	1,2	0,5
6	1,0	1,6	0,6
8	2,0	3,0	0,8
10			0,9
12			1,1
14			1,2
16	2,5	3,5	1,3
18			1,4
20			1,5
22			1,6
25	3,0	4,0	1,7

Материал фланцев с учетом коррозионной стойкости, как правило, принимается таким же, как и материал корпуса аппарата, соприкасающийся с рабочей средой. К корпусу из двухслойной стали обычно приваривают фланцы, наплавленные коррозионно-стойкой сталью или имеющие облицовку (рисунк 1) [3].

При креплении опор из углеродистой стали к корпусу аппарата, выполненному из

коррозионно-стойкой стали, может возникнуть контактная коррозия. Поэтому для исключения коррозии корпуса необходимо устанавливать накладные листы из коррозионно-стойкой стали толщиной не менее толщины сопрягаемой оболочки. Применение накладных листов можно исключить (но только из-за коррозии), если использовать для корпуса двухслойную сталь, у которой основным слоем является углеродистая сталь, а плакирующим (защитным) слоем, контактирующим с агрессивной средой, – коррозионно-стойкая сталь.

Особенностью расчета прочности оболочек из двухслойных сталей является то, что допускаемые напряжения и модуль упругости принимаются по основному слою для углеродистой стали (Ст3, стали 20К или стали 16ГС).

При изготовлении химической аппаратуры из двухслойных сталей основным и наиболее сложным процессом является сварка, поскольку слои свариваются электродами различного состава. При сварке двухслойных сталей необходимо учитывать химический состав, основные структурные особенности сталей, их физические свойства. В связи с тем, что нержавеющая сталь в биметалле имеет сравнительно тонкий слой, при сварке важно соблюдать особую осторожность, чтобы не нарушить слой нержавеющей стали. Поэтому следует обращать особое внимание на форму подготовки кромок под сварку, состав применяемых электродов при ручной сварке, сварочную проволоку и флюс при автоматической сварке и ряд других условий.

Сварка двухслойных сталей связана с большими трудностями, обусловленными применением различных технологических процессов для сварки основного и плакирующего слоев. В случае сварки двухслойной стали необходимо выполнение требований не только в отношении механической прочности, но и в отношении обеспечения коррозионной стойкости. Определенные трудности при сварке создает наличие в сварном соединении двух разнородных металлов, отличающихся по химическому составу, а также по физическим и механическим свойствам.

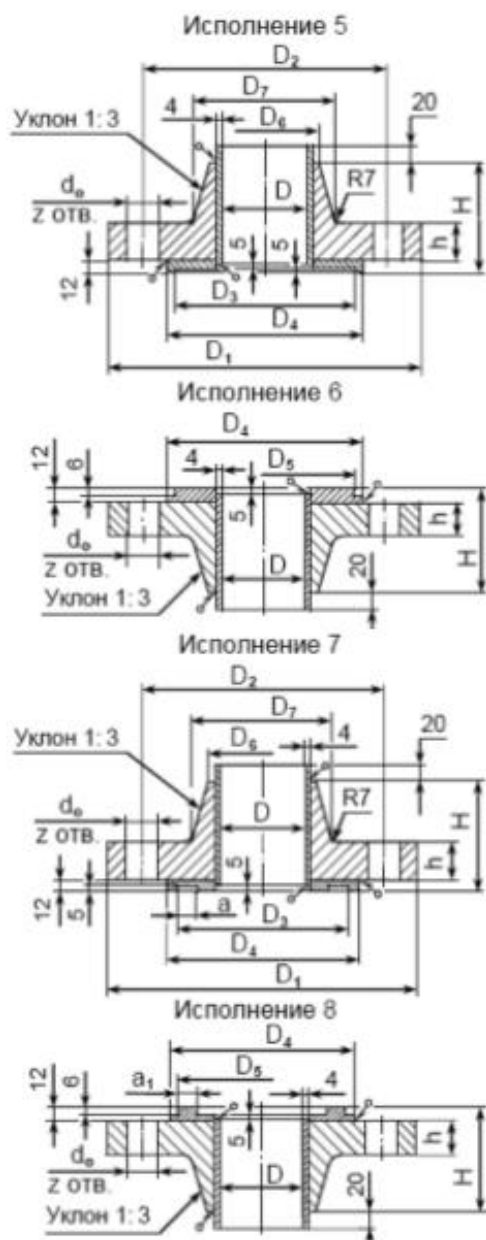


Рисунок 1 – Фланцы стальные приварные встык, облицованные листом из коррозионностойкой стали. Исполнения фланцев: 5 – с впадиной; 6 – с выступом; 7 – с пазом; 8 – с шипом. Обозначенные размеры приведены в [3].

Таким образом, сварные соединения из двухслойных сталей должны отвечать следующим требованиям:

- облицовочный слой должен быть однородным, при этом его коррозионная стойкость в месте сварки не должна быть пониженной;
- в сварном шве между облицовочным и основным слоями не должны образовываться комплексные сплавы с пониженными механическими свойствами. Достигается это

выбором способа и режима сварки, соответствующих сварочных материалов, разделки кромок и последовательности выполнения сварки.

Сварка двухслойных сталей производится следующими способами:

- автоматической сваркой под слоем флюса основного и плакирующего слоя;
- ручной дуговой сваркой основного и плакирующего слоя;
- автоматической сваркой под слоем флюса основного слоя и ручной дуговой сваркой плакирующего слоя;
- полуавтоматической сваркой в среде защитных газов основного слоя и аргонодуговой сваркой плакирующего слоя.

Основные типы и конструктивные элементы формы подготовки кромок в зависимости от способа сварки регламентированы [4]. Слои сваривают отдельно, используя различные сварочные материалы. В последнюю очередь обычно сваривают облицовочный слой для предупреждения его повторного нагрева. Сварка основного слоя обычно не представляет трудностей и выполняется в первую очередь с использованием соответствующих сварочных проволок, флюсов, электродов и т.д. После выполнения сварного шва со стороны основного слоя производится вырубка или выплавка углеродистого шва со стороны плакирующего слоя.

Наибольшую трудность представляет сварка перехода от основного слоя к облицовочному, так как разбавление этого слоя металлом нелегированного слоя резко снижает его коррозионные свойства. Поэтому при сварке переходного слоя применяют сварочные проволоки и электроды с повышенным содержанием никеля и хрома, компенсирующим разбавление металла шва основным металлом.

В некоторых случаях многослойные материалы используются для изготовления теплообменных поверхностей. Например, для поддержания заданного температурного режима в химической аппаратуре широко используют наружные теплообменные устройства – рубашки. Если стенка аппарата выполнена из биметалла, то тепловой поток проходит через такую стенку.

Другой распространенный случай применения двухслойных материалов – трубные пучки аппаратов воздушного охлаждения (АВО). В качестве конструкционного материала теплообменных труб применяется

алюминий, обладающий высоким коэффициентом теплопроводности λ при сравнительно малой плотности ρ (таблица 2). Также используются биметаллические трубы, состоящие из внутренней гладкой стальной или латунной трубы и наружной алюминиевой оребренной трубы.

При использовании биметалла в микроскопическом зазоре между внутренней и наружной трубами, заполненном воздухом, возникает дополнительное контактное термическое сопротивление R_k .

В работе [5] рассматривается влияние коэффициента оребрения теплообменных труб на процесс теплопередачи в АВО, предназначенном для конденсации пропана. Полученные значения коэффициентов теплопередачи были рассчитаны для монометаллических алюминиевых теплообменных труб без учета контактного термического сопротивления.

Таблица 2 – Сравнение свойств конструкционных материалов труб АВО

Конструкционный материал	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³
Алюминий	203,5	2700
Латунь	93	8500
Углеродистая сталь	46,5	7850
Нержавеющая сталь	17,5	7900

Величину R_k можно определить аналитически с учетом ряда допущений:

- твердые поверхности труб соприкасаются только вершинами профилей шероховатостей;
- площадь поверхности контакта пренебрежимо мала и весь тепловой поток проходит через воздушный зазор между соприкасающимися слоями;
- толщина зазора δ в среднем вдвое меньше максимального расстояния между впадинами шероховатостей δ_{max} .

Так, при использовании новых и гладких труб – стальной бесшовной без покрытия ($\delta_{max} = 0,1$ мм) и алюминиевой ($\delta_{max} = 0,06$ мм):

$$\delta = (0,1 + 0,06)/2 = 0,08 \text{ мм} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Принимая коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda = 0,026 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, выразим контактное термическое сопротивление биметаллической трубы:

$$R_k = \delta/\lambda = 8 \cdot 10^{-5}/0,026 =$$

$$= 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Полученное значение R_k эквивалентно термическому сопротивлению слоя алюминия толщиной 630 мм, латуни толщиной 286 мм, углеродистой стали толщиной 145 мм или нержавеющей стали толщиной 54 мм.

Рисунок 2 иллюстрирует зависимости коэффициента теплопередачи K при конденсации пропана в АВО от коэффициента оребрения теплообменных труб K_{op} при их различном материальном исполнении (монометаллическая алюминиевая и биметаллическая). Видно, что влияние контактного термического сопротивления биметаллических труб приводит к снижению интенсивности теплообмена.

Очевидно, что при расчетах и проектировании теплообменного оборудования с использованием биметаллических материалов необходимо учитывать контактное термическое сопротивление. При изготовлении изделий из биметаллов для уменьшения контактного термического сопротивления следует либо уменьшать шероховатость сопрягаемых поверхностей, что потребует значительных затрат на механическую обработку и приведет к существенному увеличению стоимости оборудования, либо заполнять зазоры между слоями каким-либо материалом с высоким коэффициентом теплопроводности.

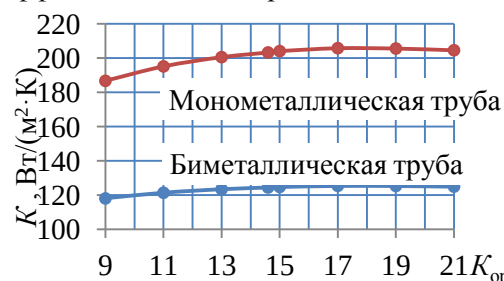


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента теплопередачи K при конденсации пропана от коэффициента оребрения теплообменных труб K_{op} при их различном материальном исполнении

Использование двухслойных сталей позволяет значительно снизить стоимость оборудования, но требует соблюдения соответствующих стандартов и приводит к определенным затруднениям, в частности, при сварке, при изготовлении теплообменных поверхностей, что ограничивает применение этого конструкционного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луцко, А. Н. Прикладная механика: учебное пособие / А. Н. Луцко, М. Д. Телепнев, Н. А. Марцулевич [и др.] ; под общ. ред. Н. А. Марцулевича – Изд. 5-е, исп. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2013. – 273 с.
2. ГОСТ 10885-85. Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия.
3. ГОСТ 28759.3-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные приварные встык. Конструкция и размеры
4. ГОСТ 16098-80. Соединения сварные из двухслойной коррозионно-стойкой стали. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
5. Щербин, С.А. Способ повышения эффективности воздушного конденсатора пропана / С.А. Щербин, А.О. Коряченко // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2022. – С. 89-90.

УДК 66.063.8.069.82

Щербин Сергей Анатольевич,

к.т.н., доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Колесниченко Виктор Александрович,

обучающийся гр. ТМ-20-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: victor.kolesnichenko8@gmail.com

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Shcherbin S.A., Kolesnichenko V.A.

RECONSTRUCTION OF THE PNEUMATIC MIXING DEVICE

Аннотация. В статье проанализированы особенности применения пневматического перемешивания в химической промышленности, указаны достоинства и недостатки этого способа. Рассмотрены основные конструкции оборудования для пневматического перемешивания и особенности его расчета. Предлагается вариант реконструкции пневматического перемешивающего устройства в реакторе для получения битума с целью повышения качества перемешивания и снижения энергетических и материальных затрат. Вместо трубчатого барботера предлагается использовать устройство типа газлифт.

Ключевые слова: перемешивание, барботаж, газлифт.

Abstract. The article analyzes the features of the use of pneumatic mixing in the chemical industry, the advantages and disadvantages of this method. The basic designs of equipment for pneumatic mixing and its calculation are considered. A variant of reconstruction of a pneumatic mixing device in a reactor for bitumen production is being considered to improve the quality of mixing and reduce energy and material costs. Instead of a tubular bubbling device, it is proposed to use a gas-lift type device.

Keywords: mixing, bubbling, gas lift.

Пневматическое перемешивание применяется для медленного смешивания маловязких жидкостей, а также при необходимости окисления перемешиваемой среды кислородом воздуха. Его осуществляют газом (чаще всего воздухом или водяным паром), проходящим через слой жидкости. Перемешивание острым паром применяют, когда необходимо одновременно перемешивать и обогревать жидкость. Подаваемый под давлением газ поднимается через жидкость, перемешивая ее. Для равномерного распределения газа по сечению аппарата применяют

барботеры, или маточники из труб различной формы (змеевик, крестовина, спираль, кольца с параллельными хордами и др.) с множеством отверстий, обычно устанавливаемые на дне аппарата.

В химической промышленности такой способ перемешивания находит применение в тех случаях, когда подача в аппарат большого количества газа связана с особенностями технологического процесса (барботажная полимеризационная аппаратура, аппараты для очистки газов и биологической очистки сточных вод и т.д.). Имеется несколько типо-