

**ТРУБЧАТЫЕ РЕБРИСТЫЕ ПОВЕРХНОСТИ
С ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫМ ТЕПЛООБМЕНОМ
И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ДЛЯ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б.¹⁾, канд. техн. наук, доц. СУХОЦКИЙ А. Б.¹⁾,
инженеры САНКОВИЧ Е. С.¹⁾, МУЛИН В. П.²⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет,

²⁾ЗАО «Октябрьскхиммаш» (Республика Башкортостан)

На предприятиях топливно-энергетического комплекса (нефтеперерабатывающие заводы, компрессорные станции магистральных и региональных газопроводов), а также в нефтехимической промышленности, электроэнергетике Республики Беларусь, Российской Федерации и большинства стран СНГ эксплуатируются тысячи аппаратов воздушного охлаждения (АВО), причем у половины из них срок эксплуатации превышает 20–30 лет. Физически изношенными и сильно загрязненными по воздушной стороне за этот срок эксплуатации оказались трубные пучки теплообменных секций, вызывающих недоохлаждения технологического продукта до технико-экономического обоснованного значения [1], что приводит к экономической потере прибыли предприятия. За длительный период эксплуатации АВО на алюминиевой поверхности оребрения биметаллических ребристых труб (БРТ) пучков возникла местная коррозия, возросла шероховатость поверхности, появились надрывы вершин ребер, а межреберные полости оказались занесенными твердыми отложениями загрязнений из окружающей среды, не поддающимися очистке. Это привело к уменьшению коэффициента теплопередачи и возросшему потреблению электрической энергии на привод вентилятора охлаждающего воздуха. Таким образом, трубные пучки требуют замены, а именно БРТ.

Возникает вопрос: какому типу БРТ [2] отдать предпочтение? Известно, что БРТ определяет энергетическую эффективность эксплуатируемого АВО в целом, который влияет на стоимость конечного продукта технологической установки. В АВО, требующих модернизации, пучки состоят из БРТ с накатанными спиральными алюминиевыми ребрами по технологии ВНИИметмаш. Однако за последние 20–25 лет для АВО разработана новая технология ЭНИКмаш [2] оребрения труб алюминиевой лентой. На ее базе получила развитие технология ЗАО «Октябрьскхиммаш» [3], которая освоена промышленностью, для ее реализации имеется высокопроизводительное оборудование. Отличительным свойством технологии является приложение к плоскости алюминиевой ленты аксиального усилия и крутящего момента, а закрепление спирального ребра на несущей трубе происходит одновременно путем обжатия горизонтальной полки ленты L-образного поперечного сечения при ее движении через щель, образованную поверхностью трубы и неподвижным телом формообразующего инструмента. Следовательно, горизонтальная полка L-ленты подвергается про-

цессу, подобному волочению через полувращающуюся щель с необходимым обжатием, что обеспечивает после ее закатывание зубчатым роликом в продольные рельефы «бороздка – выступ» на наружной поверхности несущей трубы надежное механическое соединение. Итоговым результатом технологии является новый конструктивный тип – это БРТ со спирально-навивными алюминиевыми KLM-ребрами.

Применение процесса волочения в технологии «Октябрьскхиммаша» при изготовлении спирально-навивных L- и KLM-ребер по сравнению с традиционным процессом поперечно-винтового холодного выдавливания спиральных ребер по технологии ВНИИметмаша [2] из толстостенной трубной заготовки позволили снизить затраты электроэнергии в 2,5–3 раза, уменьшить расход алюминия на оребрение в 1,5–2 раза [3], исключить из процесса смазочно-охлаждающую жидкость как источник загрязнения окружающей среды. Производительность оборудования для оребрения труб алюминиевой лентой и способом поперечно-винтовой накатки одинакова (достигает 5–7 м/мин). По оценкам специалистов, доля энергозатрат в себестоимости продукции в странах СНГ, включая Беларусь, составляет 30–40 %, что значительно выше по сравнению с западноевропейскими странами. Очевидно, что снижение таких издержек и применение энерго- и ресурсосберегающих технологий способствует повышению конкурентоспособности бизнеса. Изложенное позволяет однозначно ответить на поставленный вопрос – рекомендовать к широкому применению при модернизации АВО и изготовлению новых аппаратов БРТ с KLM-ребрами. Они удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к любой теплообменной трубе: технологичностью и освоенностью в крупносерийном производстве, ресурсосбережением, экологичностью, низкой стоимостью, высокой эффективностью [4], которая в 1,1–1,46 раза превышает этот показатель для БРТ с накатными алюминиевыми ребрами, применяемыми в АВО первого и второго поколений.

Разработанные авторами и представленные в статье конструкции БРТ с интенсифицированным теплообменом базируются на промышленной технологии «Октябрьскхиммаша», дополняя ее отдельными технологическими операциями без нарушения единого процесса изготовления с высокой производительностью, при этом достижение повышенной энергетической эффективности труб является приоритетным направлением.

Трубы в пучках АВО первого и второго поколений [1] расположены в вершинах равностороннего треугольника с шагом $S_1 = S'_2 = 58$ мм, где S_1 и S'_2 – соответственно поперечный и диагональный шаги. Пучки собраны из БРТ с накатными спиральными алюминиевыми ребрами наружного диаметра $d = 56$ мм, коэффициент оребрения которых $\phi = 15,2$. Зазор между вершинами ребер соседних труб в поперечном ряду $n = S_1 - d = 2$ мм. Одним из наиболее просто реализуемых в производстве способов увеличения аппаратной тепловой мощности АВО, повышения энергетической эффективности и снижения материалоемкости является применение труб с максимально достигнутым коэффициентом оребрения $\phi = 21,5–22$ [4, 5]. Это значение ϕ обеспечивается при изготовлении серийных БРТ со спирально-навивными KLM-ребрами с $d = 57$ мм и шагом ребер $s = 2,5–2,3$ мм.

Однако непосредственное применение таких труб в модернизируемых пучках невозможно по причине уменьшения зазора n до 1 мм.

При прогибе труб происходит защемление вершин ребер, выпучивание труб, возрастает загрязняемость, снижаются эксплуатационная надежность, тепловая мощность. Авторами разработана новая энерго- и ресурсосберегающая БРТ [6] (рис. 1), которая не имеет ограничений для применения в АВО из труб с $\phi = 15,2$. Теплообменная труба состоит из несущей стальной трубы 1 со спирально-навивными на нее разновысокими 2 и 3 алюминиевыми KLM-ребрами с диаметром по основанию d_0 . Высокие однозаходные ребра 2 имеют в плане вид круговых дисков, сегменты которых отогнуты с противоположных сторон трубы по линии хорды 4. Линия хорды находится от оси трубы на расстоянии, равном половине наружного диаметра d_1 низкого ребра. Расстояние между поверхностями подогнутых ребер $D' = d_1 + 2\Delta$, где Δ – толщина высокого ребра. Низкие ребра 3 также однозаходные, причем они расположены в периодически чередующемся порядке с высокими ребрами. Применение низких ребер наряду с высокими подогнутыми приводит к снижению материалоемкости поверхности оребрения труб до 22 %. Подогнутые ребра турбулизируют поток воздуха с уменьшением его градиента скорости по высоте межреберного канала, что в сочетании с увеличенным коэффициентом эффективности низких ребер в сравнении с высокими интенсифицирует теплоотдачу на 20–30 % по сравнению с теплоотдачей равновысотных ребер. Подгибка ребер выполняется протягиванием трубы через параллельные направляющие, расстояние между внутренней поверхностью которых равно D' . Высокая пластичность (мягкость) алюминия и небольшая толщина ребра $\Delta \approx 0,30\text{--}0,35$ мм обеспечивают надежную и качественную подгибку высоких ребер.

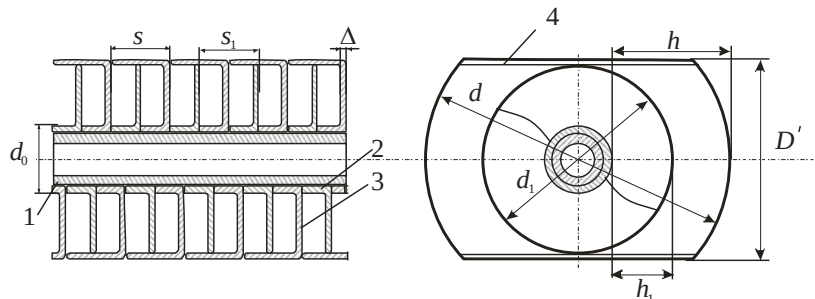


Рис. 1. Биметаллическая труба с подогнутыми KLM-ребрами

Для теплообменных секций модернизируемых АВО рекомендуется назначать параметры высоких ребер $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 57 \times 25,8 \times 15,6 \times 5,0 \times 0,35$ мм, а параметры низких ребер $d_1 \times d_0 \times h_1 \times s_1 \times \Delta = 47 \times 25,8 \times 10,6 \times 5,0 \times 0,35$ мм. Коэффициент оребрения трубы $\phi = 18,15$. Применение этой трубы увеличивает площадь теплообмена модернизируемого пучка в $18,5/15,2 = 1,2$ раза, а с учетом даже наименьшего значения интенсификации теплоотдачи подогнутыми ребрами теплосъем возрастет в $1,2 \times 1,2 = 1,44$ раза, что потенциально эквивалентно использованию трубы с равновысотными KLM-ребрами при $\phi = 22$.

В конструкции БРТ [7] на рис. 2 для интенсификации теплопередачи по воздушной стороне применен вихревой способ, отличительной особенно-

стью которого при оптимальных параметрах интенсификаторов является опережающий прирост теплоотдачи по сравнению с ростом аэродинамического сопротивления, что энергетически исключительно выгодно. В качестве интенсификаторов целесообразно применять сферические лунки (углубления) на боковой поверхности ребра. Теплообменная труба содержит несущую металлическую трубу 1 круглого поперечного сечения и спирально-навивные на нее алюминиевые KLM-ребра 2 одинаковой высоты. На кольцевом участке шириной m с одной боковой поверхности каждого ребра расположены сферические лунки 3 диаметром d_c . Лунки могут располагаться как по вершинам равностороннего треугольника, так и по концентрическим окружностям с шагом s_c . Величина плотности лунок на каждом ребре находится в интервале $\gamma = 55\text{--}65\%$. При этой плотности пограничный слой воздуха испытывает непрерывное воздействие вихрей, генерируемых лунками, что в наибольшей мере повышает энергетическую эффективность трубы. Глубина лунок выбирается такой, чтобы под каждой из них на противоположной боковой поверхности этого ребра появились плавно очерченные выступы 4 высотой h_b , большей толщины δ_n пограничного слоя воздуха на кольцевом участке поверхности ребра, т. е. $h_b > \delta_n$. Выступы не должны «тонуть» в пограничном слое для их разрушающего воздействия на него. Энергетическая эффективность трубы по стороне оребрения увеличивается в 1,8–2,1 раза при одинаковой затрате мощности приводом вентилятора с гладко-поверхностными KLM-ребрами. Наличие лунок также повышает эксплуатационную надежность трубы. Образовавшиеся вихри препятствуют осаждению загрязнений, выталкивая их в ядро межреберного потока, и далее выносятся воздухом вне трубы (пучка труб).

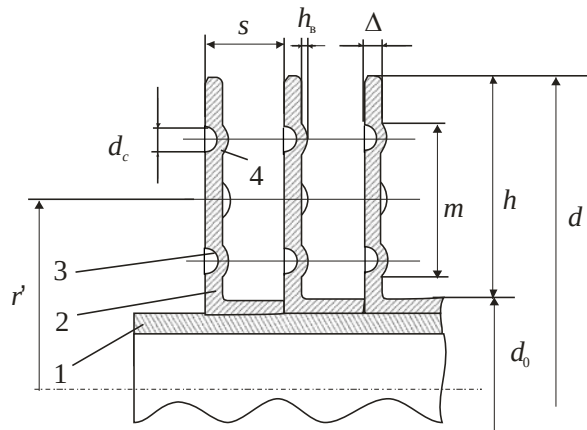


Рис. 2. Биметаллическая труба с KLM-ребрами со сферическими лунками

Для сохранения на спиральном ребре сферической формы лунок необходимо располагать их на нейтральной линии и в ее окрестности на одинаковом расстоянии по одну и другую стороны шириной m . Радиус нейтральной линии (слоя) ребра $r' = (r \cdot r_0)^{0,5}$, где $r = 0,5d$ – наружный радиус ребра; $r_0 = 0,5d_0$ – радиус ребра по его основанию.

Для АВО с трубами третьего поколения размерами $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 57 \times 26 \times 15,5 \times 2,5 \times 0,3$ мм $\phi = 20,9$. Можно рекомендовать для KLM-ребер с $d_c = 3$ мм; $m = 8$ мм; $r' = 19,25$ мм общее количество лунок на ребре –

80 шт., $h_b \approx 0,3\text{--}0,6$ мм. Лунки наносятся по трем окружностям с радиусами $r_1 = 21,75$ мм; $r_2 = r' = 19,25$ мм и $r_3 = 16,75$ мм.

Промышленное изготовление таких труб возможно исключительно по технологии «Октябрьскиммаша» (рис. 3), оснащенной дополнительно новыми узлами [8].

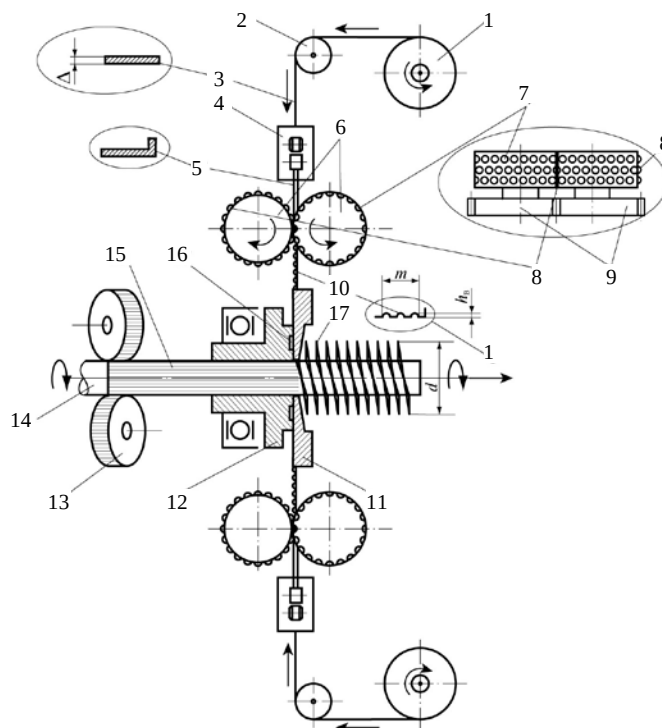


Рис. 3. Технологическая схема изготовления БРТ с «облученными» ребрами

Технологическая схема предназначена для формирования двухзаходного оребрения и состоит из разматывающего устройства (бобины) 1, на которое уложен рулон алюминиевой ленты 3 толщиной $\Delta = 0,4$ мм прямоугольного поперечного сечения, направляющего ролика 2, механизма 4 для профилирования ленты 3 в ленту L-образного поперечного сечения 5, лункообразующего устройства 6, состоящего из двух роликов, на рабочей поверхности одного из которых (матрица) 7 имеются лунки, а на другом (пунсон) 8 – выступы. Ролики соединены между собой при помощи шестерен 9. Посредством двух роликов вследствие обжима между ними ленты образуются на одной ее боковой поверхности лунки (выемки), а на противоположной боковой поверхности под лунками возникают выпуклости высотой h_b . После лункообразующих роликов L-образная лента 10 с лунками поступает в навивочный инструмент, состоящий из неподвижной 11 и вращающейся 12 частей, которые имеют центральное отверстие для прохода несущей трубы 14 с гладкой наружной поверхностью, взаимодействующей с приводными роликами 13, развернутыми на угол, соответствующий осевой подаче трубы. Рабочая часть роликов 13 выполнена рифленной, посредством которой на наружной поверхности несущей трубы формируется искусственная шероховатость в форме «бороздка – выступ» 15. На торце

вращающегося инструмента 12 расположены рифления 16 – тоже в виде выступов – впадин, которые внедряются в ленту и при его круговом вращении закручивают ее в рабочем канале в непрерывную спираль 17 с последующим обжатием (закаткой) ее горизонтальной полки в шероховатость на несущей трубе. В итоге получаем БРТ с интенсифицированными двухзаходными KLM-ребрами в соответствии с рис. 2. Скорость вращения шестерен синхронна скорости вращения несущей трубы. Ролики 7, 8 находятся в единой технологической линии с остальными узлами. Благодаря этому дополнение технологического процесса лункообразующим устройством не снижает процесса изготовления трубы в сравнении с изготовлением трубы с гладкими спирально-навивными KLM-ребрами. При необходимости ролики легко демонтируются или могут быть раздвинуты между собой на некоторое расстояние, достаточное для свободного движения ленты между ними без соприкосновения. В таком случае будет изготавливаться БРТ с традиционными гладкими (без элементов турбулизации потока на боковой поверхности) спирально-навивными KLM- или L-ребрами.

Основным теплотехническим недостатком БРТ является возникновение контактного термического сопротивления (КТС) при передаче теплового потока, которое отсутствует в монометаллических ребристых трубах. Величина КТС зависит от целого ряда физико-механических свойств контактируемых поверхностей, но при одинаковых условиях доминирующее влияние оказывают контактное давление p_k и величина площади F_k контак-

тируемых поверхностей. В процессе изготовления БРТ величина P_k исключительно зависит от выбранного способа оребрения и ориентирована на достижение максимального значения, что практически лишает возможности воздействовать этим параметром на КТС. В то же время величина F_k является параметром, значение которого поддается относительно доступному управлению (изменению). Этот принцип заложен в новой конструкции БРТ [9] со спирально-навивными алюминиевыми однозаходными 3 (рис. 4а) и двухзаходными 4 (рис. 4б) KLM-ребрами. Теплообменная труба состоит из металлической несущей трубы 1 наружного диаметра d_n с накатанными на ее наружной поверхности рифлениями 2 шевронного типа с углом β при вершине и спирально-навивного под натяжением KLM-ребра наружного диаметра d с шагом s . Горизонтальная полка 5 ребра механически плотно соединена с рифлениями шевронного типа, поперечное сечение которых представляет «впадину – выступ» (бороздки) глубиной и шириной 0,2–0,3 мм и шагом 1–2 мм. При однозаходном оребрении горизонтальная полка 5 ребра должна занимать всю ширину b шевронного рифления, которая назначается равной шагу s . Предотвращается осевое перемещение ребра вследствие устранения результирующего осевого усилия из-за встречного направления сил с левой и правой сторон шевронного рифления, действующих на полку. Ликвидируется первопричина появления микрозазоров в контактной зоне, повышается тепловая эксплуатационная надежность, возрастает устойчивость к атмосферной коррозии, расширяется температурный диапазон применимости до 270–275 °С по температуре стенки,

значение КТС уменьшается в 1,14–1,42 раза. Угол β назначается равным 100° – 160° , что обеспечивает увеличение F_k до 21 %.

При двухзаходном оребрении полка 5 ребра располагается на половине ширины b шевронного рифления, а ширина назначается равной $b = 2s$. По существу одна из сторон, например левая, шевронного рифления предназначена для полки 5 первого захода, обозначенного I, а правая сторона – для полки 4 ребра второго захода, обозначенного II (рис. 4б). Сохраняются все преимущества однозаходного оребрения, но дополнительное преимущество – рост производительности технологического процесса в 1,8–2 раза.

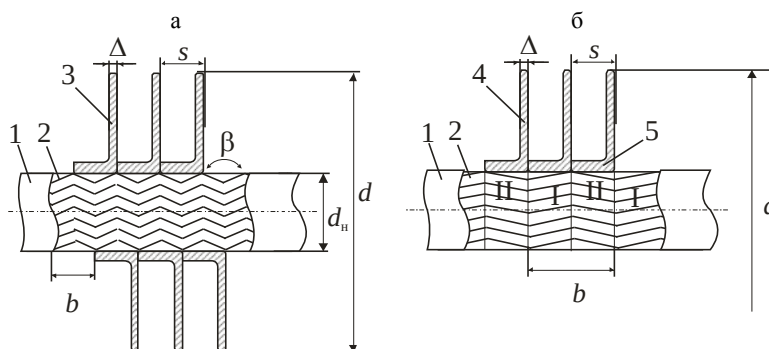


Рис. 4. Биметаллическая труба с однозаходными (а) и двухзаходными (б) KLM-ребрами

Узел накатки (рис. 5) шевронных рифлений 2 состоит из трех приводных накатных роликов 3, равномерно через 120° установленных вокруг несущей трубы 1, на которой накатываются рифления. На участках c_1 и c_2 с разным наклоном рифлений (левая и правая стороны) навиваются спирали L-образного сечения I и II заходов. Для создания кругового и продольного перемещений трубы оси накатных роликов повернуты относительно продольной оси трубы на угол γ , равный углу подъема винтовой линии, образованной вершиной шевронных рифлений. Угол рассчитывается как

$$\arctg \gamma = \frac{s}{\pi d_{cp}},$$

где $d_{cp} = 0,5(d_1 + d_2)$ – средний диаметр рифлений; d_1, d_2 – соответственно диаметр по вершинам и впадинам рифлений.

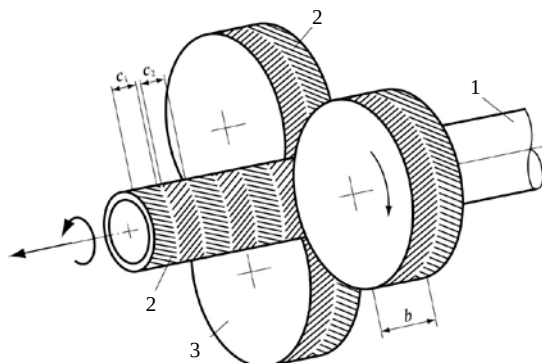


Рис. 5. Аксонометрическое изображение узла накатывания шевронных рифлений

В остальном изготовление такой трубы осуществляется в соответствии с технологическим процессом, показанным на рис. 3.

В конструкции БРТ (рис. 6а) получил дальнейшее развитие принцип увеличения F_k для снижения КТС. Здесь шевронные рельефы контактной зоны предыдущей БРТ преобразованы в сеть четырехугольных пирамид, примыкающих своими основаниями друг к другу, угол γ при вершине каждой грани четырехугольной пирамиды выбран из интервала $60^\circ\text{--}90^\circ$, а угол β взаимного пересечения рядов остроконечных пирамид выбран из того же интервала. БРТ состоит из металлической несущей трубы 1 наружного диаметра d_n с нанесенными на ее наружной поверхности механическим способом, подобным описанному в рис. 4, рельефами 2 в виде остроконечных четырехугольных пирамид и спирально-навивного под натяжением L-ребра 3 с шагом s , горизонтальная полка 4 которого механически соединена с рельефами, которые изображены в аксонометрии на рис. 6б. Шаг рельефов целесообразно выбирать $s_p = 0,8\text{--}1,0$ мм. После механического соединения полки 4 получается KLM-ребро. Применение рельефов в виде пирамид позволяет увеличить площадь F_k в 1,8 раза в сравнении с шевронными рельефами. Значение КТС уменьшается до 1,45 раза, интенсификация теплопередачи достигает 6 %, но самое важное – это увеличение предельной температуры стенки в контактной зоне до 300°C , при которой сохраняется исходное значение теплового потока, равное БРТ с накатными по технологии ВНИИметмаша спиральными алюминиевыми ребрами.

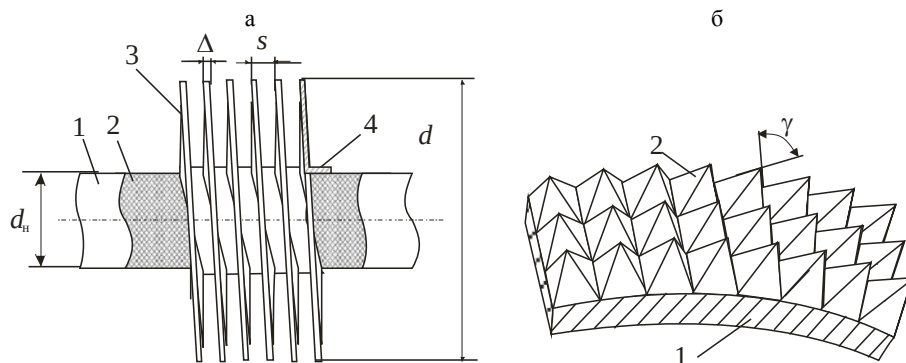


Рис. 6. Биметаллическая труба с KLM-ребрами (а) и аксонометрическое изображение (б) рельефов пирамидальной формы на поверхности несущей трубы

Для повышения эксплуатационной тепловой надежности и обеспечения стабильности процесса теплопередачи при многоцикловом режиме эксплуатации «пуск – останов» АВО разработан новый способ [10] изготовления БРТ с KLM-ребрами, применяемых в высокотемпературных технологических установках. Он реализуется в соответствии со схемой на рис. 7а посредством здесь же изображенного устройства. Исходная несущая труба 1 подается в три накатных ролика 2, равномерно расположенных вокруг трубы (для простоты изображения показаны два ролика). Ролики повернуты относительно продольной оси трубы на угол, соответствующий ее осевой подаче. На одной оси с накатными роликами 2 установлены ролики 3 с гладкой рабочей поверхностью. Количество гладких роликов соответствует количеству накатных. Посредством приводных накатных роликов несущая

шая труба вращается и перемещается с заданным шагом, при этом на наружной поверхности трубы от действия роликов 2 накатываются рифления требуемой формы. Гладкие ролики обжимают вершины полученных рифлений до образования грибовидной формы. Далее несущая труба с таким рифлением поступает в зону навивочного инструмента и приводится во вращение шпиндель 4, который внедряется в плоскость ленты 6 своим захватывающими выступами 11, расположенными на его торцевой поверхности, и осуществляет ее закручивание. Между несущей трубой и внутренней торцевой поверхностью 10 формообразующего фланца 5 предусмотрен зазор, который меньше исходной толщины Δ_1 горизонтальной полки L-образной ленты 6, раскручиваемой с бобин 8. Толщина полки после обжатия $\Delta_2 = (0,2-0,5)\Delta_1$. Торцевая поверхность имеет толщину, равную ширине горизонтальной полки L-образной ленты 6. При вращении труба с рифленой поверхностью обжимает горизонтальную полку L-образной ленты в этом зазоре таким образом, что материал ленты, а это высокопластичные сплавы алюминия и меди, заполняет пространство (карманы), образованные между соседними бороздками. Поскольку рифления имеют грибовидную форму, полка L-ленты надежно фиксируется в них как в осевом, так и в радиальном направлениях. В результате образуется прочно-плотный механический контакт и, как следствие, – надежный термический контакт KLM-ребра с трубой. Итогом реализации изложенного способа является теплообменная труба с KLM-ребрами, фрагмент поперечного сечения которой приведен на рис. 7б, и KLM-ребро 2, материал полки которого полностью заполнил карманы между рифлениями (продольные рифления 1 треугольного поперечного сечения на поверхности несущей трубы с обжатыми вершинами до грибовидной формы изображены на рис. 8а). Конструкция данного БРТ интенсифицирует на 15–20 % контактный теплообмен вследствие устранения в карманах рифлений воздушных мешков и может надежно эксплуатироваться при температуре охлаждаемой среды до 320 °С на входе в нее.

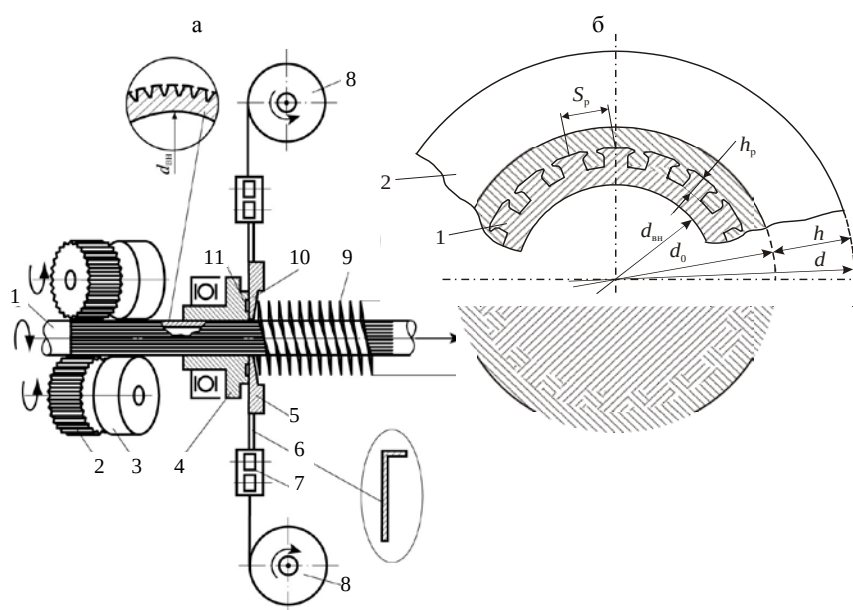


Рис. 7. Технологическая схема изготовления БРТ с рифлениями грибовидной формы (а) и фрагмент БРТ (б) с этими рифлениями

На рис. 8б изображен фрагмент несущей трубы внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}$ с рифлениями в виде четырехугольных пирамид 1, вершины которых обжаты по изложенной технологии до грибовидной формы. На рис. 8в дан поперечный разрез несущей трубы с продольными рифлениями до их механического обжатия. Указанные значения в миллиметрах геометрических параметров рифлений по нашим опытам наиболее предпочтительны как для реализации в серийном производстве БРТ, так и по теплоэнергетическим требованиям. Эти же рифления после процесса их обжатия даны на рис. 8г. Оптимальными параметрами обжатых рифлений являются: $s_k = (0,8-1,2)\Delta_1$; $s_p = 1,0-1,2$ мм; $h_p = (0,2-0,3)s_p$.

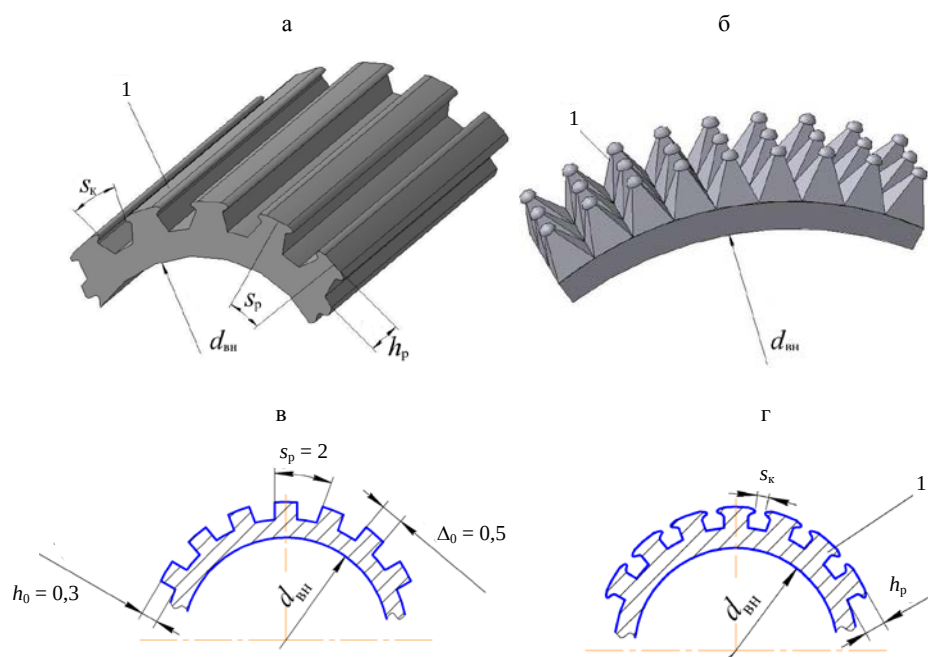


Рис. 8. Рекомендуемые формы рифлений на наружной поверхности несущей трубы

ВЫВОДЫ

Расширенное внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий и новых биметаллических ребристых труб с интенсифицированным теплообменом, характеризующихся высокой технологичностью при промышленном изготовлении, позволит:

- в одинаковых габаритах стандартизированных теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения интенсифицировать процесс теплопередачи, снизить в 1,5–2 раза массу секции, увеличить тепловой поток аппарата при неизменных затратах мощности приводом вентилятора;
- увеличить эксплуатационную надежность в области высоких температур (до 320 °С) и обеспечить стабильную тепловую характеристику аппаратов воздушного охлаждения при многоцикловых условиях работы;

- уменьшить загрязняемость трубного пучка по воздушной стороне и увеличить длительность межремонтных периодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Керн, Д. Развитые поверхности теплообмена: пер. с англ. / Д. Керн, А. Краус. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.
2. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справ. / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
3. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков из круглых труб с подогнутыми спиральными KLM-ребрами / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2003. – № 11. – С. 10–14.
4. Кунтыш, В. Б. Анализ тепловой, объемной и массовой характеристик теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, А. Э. Пиир // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 5. – С. 3–6.
5. Кунтыш, В. Б. Основные способы энергетического совершенствования аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, А. Н. Бессонный, А. А. Бриль // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 41–44.
6. Теплообменная секция: пат. 2213920 России, МПК C2, F 28 D 3/02 / В. П. Мулин, И. И. Кочетов, Р. Ф. Теляев, В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов, А. В. Самородов; заявитель ЗАО «Октябрьскхиммаш». – № 2001119695; заявл. 16.07.2001; опубл. 15.07.2003 // Бюл. изобрет. / Роспатент. – 2003. – № 28. – С. 70.
7. Устройство для изготовления теплообменной трубы со спирально-навивными ребрами: заявка на полезную модель Респ. Беларусь, МПК В 21 D 11/06 / В. Б. Кунтыш, В. П. Мулин, Е. С. Санкович, А. Ш. Миннигалева; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № и 20120381; заявл. 05.04.12.
8. Теплообменная ребристая труба: пат. 4814 Респ. Беларусь, МПК F 28 F 1/00 / В. Б. Кунтыш, В. И. Володин, Е. С. Санкович, В. П. Мулин, А. Э. Пиир, А. Ш. Миннигалева, Г. Г. Баранов; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № и 20080322; заявл. 17.04.08; опубл. 30.10.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 36.
9. Теплообменная биметаллическая ребристая труба: пат. 14907 Респ. Беларусь, МПК F 28 F 1/00 / В. Б. Кунтыш, Е. С. Санкович, В. П. Мулин, А. Ш. Миннигалева, А. Э. Пиир, И. Р. Гаязов, А. Л. Соловьев; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № и 20091539; заявл. 28.10.09; опубл. 30.10.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 4. – С. 58.
10. Способ и устройство для изготовления теплообменной трубы с KLM-ребрами: пат. 16177 Респ. Беларусь, МПК В 21 С 37/15 / В. Б. Кунтыш, В. П. Мулин, Е. С. Санкович, А. Э. Пиир, А. Ш. Миннигалева, А. Л. Соловьев, О. В. Петрович; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 2010366; заявл. 11.03.10; опубл. 30.08.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 4. – С. 44.

Представлена кафедрой энергосбережения,
гидравлики и теплотехники

Поступила 12.11.2012

УДК 536.2 (075)

ОРТОГОНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Докт. физ.-мат. наук КУДИНОВ В. А.,
инженеры КОТОВА Е. В., ЕРЕМИН А. В., КУЗНЕЦОВА А. Э.

Самарский государственный технический университет

Для определения требуемого сочетания свойств многослойных конструкций наилучшим образом подходят аналитические (приближенные ана-