



УДК 532.5:621.694

Багоутдинова А.Г. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Золотонос А.Я. – кандидат технических наук, инженер

Золотонос Я.Д. – доктор технических наук, профессор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Яхнев М.Н. – инженер-механик цеха радиальнойковки

ООО «МЕТЧИВ»

Адрес организации: 454091, Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 21 в, оф. 613

Современные теплообменные элементы теплообменного оборудования и технологии их изготовления

Аннотация

В работе проведены исследования конструкции теплообменных элементов, используемые в трубных пучках теплообменного оборудования и выполненные в виде гладких труб, труб с искусственной шероховатостью стенок, а также витых труб типа «конфузор-диффузор» и пружинно-витых каналов, защищенных патентами РФ. Приведены традиционные технологии получения гладких труб и альтернативные способы их производства. Особое внимание отведено современным технологиям получения витых труб типа «конфузор-диффузор» и пружинно-витых каналов. Предложенные технологии позволяют получать трубы высокого качества и с заданной геометрией проточной части.

Ключевые слова: витые трубы типа «конфузор-диффузор», пружинно-витые каналы, лазерная сварка, ротационнаяковка.

Одним из основных узлов поверхностных рекуперативных теплообменных аппаратов (ТА) являются трубные пучки, состоящие из теплообменных элементов в виде гладких труб [1, 2], витых труб «конфузор-диффузор» [3-5], пружинно-витых каналов [6-8], а также теплообменных элементов с искусственной дискретной шероховатостью стенки в форме проволочных вставок [4, 9, 10], кольцевых или спиральных выступов, канавок и выемок [9].

Наиболее компактные трубные пучки таких ТА изготавливают из гладких бесшовных или сварных труб с наружным диаметром 6...12 мм и толщиной стенки в 1 мм, однако очистка таких труб затруднена [1].

Поэтому в ТА машиностроения, химической, нефтехимической промышленности и энергомашиностроения используют гладкотрубные теплообменные элементы диаметром 20...38 мм и толщиной стенки 0,75...5 мм, а на их базе трубы с дискретно-шероховатой поверхностью теплообмена, с внешним продольным оребрением и винтовым накатным оребрением [4]. По существующим технологиям [1] бесшовные трубы изготавливают горячекатаными, холоднокатаными и холоднотянутыми. Основными технологическими операциями производства бесшовных горячекатаных труб служат: прошивка слитка или трубной заготовки в гильзу; прокатка гильзы в трубу, отделка и калибровка трубы на раскатном и калибровочном станах. Дальнейшая обработка трубной заготовки в тонкостенную трубу осуществляется на трубопрокатных станах [1, 11, 12].

Холоднокатаные бесшовные трубы получают на роликовых или валковых станах холодной прокатки, а холоднотянутые – путем протяжки (за несколько проходов) горячекатаной трубы через волочильное очко. Волочение труб может производиться без оправки или на оправке.

Сварные трубы производят с использованием печной сварки, когда заготовка в виде полосы (штрипса) нагревается в печи до сварочной температуры, а ее формовка в трубу и сварка осуществляется в валках формовочно-сварочного стана и электросваркой, в том числе: контактной сваркой, сваркой сопротивлением, дуговой, индукционной или радиочастотной [1].

Развитием традиционных технологий изготовления труб является производство с использованием центробежных сил, где расплавленный металл свободно заливается во вращающуюся форму (металлическую, песчаную или керамическую), а за счет центробежных сил и трения о форму вовлекается во вращательное движение, приобретая форму тела вращения [11, 12].

Вращение может быть реализовано вокруг горизонтальной, вертикальной, наклонной оси или сложном вращении формы.

Таким образом получают стальные трубы длиной 2...5 м, диаметром 50...100 мм и толщиной стенки 7,5...30 мм, а также изделия и другого ответственного назначения. Одним из основных технологических параметров, определяющих качество литья, является частота вращения формы, рассчитываемая с учетом коэффициента гравитации – К [11].

При разработке технологии центробежного литья следует учитывать его специфику. Так, чрезмерное увеличение частоты вращения формы может вызвать образование в отливках продольных трещин на наружной поверхности и повышенную ликвацию элементов сплава. Нижний предел частоты вращения формы определяется условием, при котором заливаемый в форму металл во время первого оборота вокруг оси должен получить ускорение, превышающее ускорение «сил тяжести», невыполнение этого условия приводит к «дождеванию» металла при заливке форму.

Так, для разрабатываемых нами витых труб типа «конфузор-диффузор» [5, 13] с внешним диаметром 25 мм частота вращения формы будет равна:

$$n = 42,3 \sqrt{\frac{K}{D}} = 42,3 \sqrt{\frac{80}{0,025}} = 2545 \text{ об/мин},$$

где D – внешний диаметр формы, м. При этом для песчаной формы с горизонтальной осью вращения $K = 75$, для металлической – $K = 80$, для сплавов с узким интервалом затвердевания $K = 90...100$.

Как следует из результатов расчетов, рассматриваемый сортамент труб не определен номенклатурой изделий, производимых методом центробежного литья. Кроме того, для этих целей потребуются разработка конструктивно более сложной машины, менее ее удобной в эксплуатации и менее безопасной в работе.

Перспективным способом формирования цельных труб сложной формы является технология гидравлической вытяжки, известная как гидроформинг [14]. По этой технологии под действием внутреннего давления среды (порядка 2000...4000 атм) производят холодную штамповку изделия.

Формовка труб давлением при гидроформинге происходит по следующей схеме. Заготовка в виде цилиндрической трубы фиксируется внутри пресс-формы, затем пресс-форма закрывается, а на внутренние стенки заготовки начинают воздействовать высоким гидростатическим давлением. При этом стенка трубы начинает расширяться, упирается во внутренние контуры пресс-формы и прижимается к ним. Таким образом внешние и внутренние стенки трубы точно копируют внутренний контур пресс-формы, формируясь в виде канала с заданной конфигурацией.

Расчеты показывают, что формирование трубы типа «конфузор-диффузор» гидростатическим давлением по этой технологии должно составить [1]:

$$P = \frac{200 \cdot S \cdot R}{D_{\text{вн}}} = \frac{200 \cdot 2 \cdot 30}{20} = 600 \text{ кг/см}^2,$$

где $S = 2$ мм – толщина стенки трубы, $R = 30$ кг/мм² – допускаемое напряжение на растяжение для нержавеющей стали, $D = 20$ мм – внутренний диаметр трубы.

Следует отметить, что гидроформинг позволяет быстро получать готовую деталь, изделие, получаемое по этой технологии, имеет товарный вид, чем при стандартных процессах штамповки и прессования, исключается последующая их доводка, появляется возможность получать детали с суженным выходным сечением.

Однако технология гидроформинга имеет недостатки: малая производительность, обусловленная длительностью операции установки и зажатия заготовки, необходимость уплотнения рабочей полости при заполнении ее жидкостью, высокая базовая стоимость установки в целом, ориентированность на один выпускаемый профиль.

Одним из наиболее перспективных технологий получения витых труб типа «конфузор-диффузор» [5, 13] является способ ротационной ковки (или ротационного обжатия), являющийся разновидностью ковки и осуществляемый на специальных ротационно-ковочных устройствах.

Главным элементом такой машины является инструмент деформирования, состоящий из четырех сегментов, расположенных концентрически вокруг изделия. Инструмент осциллирует с высокой частотой и маленьким ходом (долбит изделие). Частота хода при деформировании, в зависимости от типа машин, колеблется от 1500 до 10000 ударов в минуту, при этом длина хода варьируется от 0,2 до 5 мм.

Преимуществом ротационной ковки является: относительно низкая стоимость деформирующего инструмента, возможность быстрой переналадки машины на другое изделие, высокая производительность процесса, отсутствие жесткой привязки к мерности заготовки в пределах одной партии.

Процесс ротационной ковки витой трубы типа «конфузор-диффузор» реализуется в холодном состоянии на ротационной ковочной машине SSK-14 фирмы GFM (Австрия) согласно схеме, представленной на рис. 1.

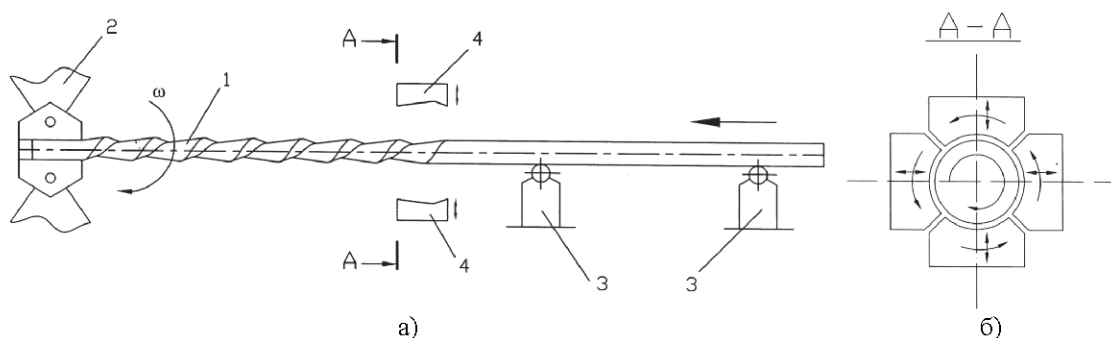


Рис. 1. Процесс ротационной ковки витой трубы типа «конфузор-диффузор»: а) схема установки; б) сегменты инструмента деформирования

После подачи заготовки – трубы 1 загрузочным устройством – грейфером (на рис. 1 не показано) на ось инструмента деформирования, трубу 1 фиксируют захватом зажимной головки 2 манипулятора, а для предотвращения ее изгиба поддерживают блоком опор 3.

Затем труба 1 свободным краем подводится к инструменту деформирования, включается вращение заготовки, а сегменты сводятся с зазором в 1 мм, что не препятствует свободному перемещению заготовки в деформирующем блоке. Далее заготовка полностью вводится в деформирующий блок, а зажимная головка 2 манипулятора перемещается в крайнее ближнее положение относительно блока деформирования. При вращающейся заготовке сегменты деформирующего блока медленно сводятся и начинается ротационное обжатие заготовки.

Процесс ротационной ковки контролируется аппаратно-программным комплексом. Это позволяет вести ковку в режиме работы сегментов формирующего блока $\pm 0,1$ мм, скорости сведения – 1 мм/с, точности позиционирования инструмента деформирования – 1 мм, вращение заготовки вести в интервале $16 \pm 0,1$ об/мин, скорости протягивания (хода) изделия – 0,7 м/мин, частоте осцилляции инструмента деформирования – 500 ударов в минуту и усилием ковки – 5000 кг.

Конфигурация витого канала типа «конфузор-диффузор» задается векторно-параметрическим уравнением вида [15]:

$$\vec{r}(t, s) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_0 \sin t \\ bt \end{pmatrix} - cs \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{l(1-s)}{\sqrt{r_0^2 + b^2}} \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r_0 \end{pmatrix},$$

и с помощью аппаратно-программного комплекса выполняется в полном его соответствии с математическим описанием.

На рис. 2 представлены образцы витой трубы типа «конфузор-диффузор», полученные методом ротационнойковки.



Рис. 2. Образцы витой трубы типа «конфузор-диффузор» из нержавеющей и углеродистой стали

Перспективным направлением в создании конструкций современных теплообменных элементов являются трубы в виде пружинно-витых каналов, представляющих собой тугую пружину, витки которой жестко скреплены [6-8]. Процесс получения таких каналов может быть реализован путем плотной намотки проволоки на оправку с последующим соединением витков между собой посредством лазерной сварки [16, 17]. Применение лазеров обусловлено гибкостью и универсальностью лазерного излучения как технологического инструмента. Кроме того, лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, существенно превосходящую другие источники энергии, используемые для сварки.

Это позволяет: в десятки раз увеличить скорость сварки, уменьшить время теплового воздействия на деталь и сварочную ванну, тем самым, значительно снизить величину остаточных напряжений, вызывающих деформации изделий, сохранить форму изделия и выполнять сварку малогабаритных деталей, выдерживая геометрические размеры в микронном поле допуска; высокое значение коэффициента сосредоточенности теплового сварочного источника энергии и высокая точность дозировки энергии лазерного излучения позволяют существенно снизить размер зоны термического влияния и сваривать тонкостенные детали без прожогов.

Кроме того, посредством лазерной сварки представляется возможность получения равнопрочного сварного соединения, при этом в большинстве случаев прочностные свойства сварного соединения выше прочности свариваемого материала [16, 17].

Учитывая уникальные возможности лазерного источника нагрева, проведены работы по применению технологии лазерной сварки для изготовления пружинно-витых каналов диаметри $D_y = 25$ мм из проволоки круглого сечения диаметром 2 мм, описываемых векторно-параметрическим уравнением [18]:

$$\vec{r}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_0 \sin t \\ bt \end{pmatrix} - c \cos \varphi \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{c \sin \varphi}{\sqrt{r_0^2 + b^2}} \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r_0 \end{pmatrix}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n.$$

Здесь r_0 – радиус проточной части, c – радиус проволоки, n – число витков, $b = r_0/\pi$ – параметр винтовой линии, характеризующий плотное прилегание витков проволоки.

Сварка пружинно-витых каналов производится на универсальном стенде, в состав которого входят дисковый однокilоватный лазер TruDisk 1000 производства фирмы TRUMPF (Германия), чиллер KLH L20. HL 29, четырехкоординатный станок СК4 с системой управления Сервокон 1000 и вращатель.

На рис. 3 представлен образец пружинно-витого канала, полученный с использованием лазерной сварки.

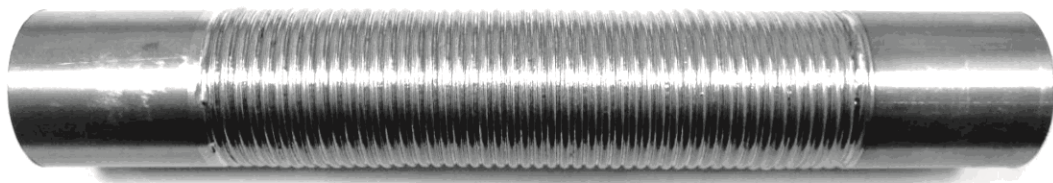


Рис. 3. Образец пружинно-витого канала, полученный с использованием лазерной сварки

Исследования показали, что сварка плотно прижатых витков [16, 17] дает значение глубины проплавления в пределах $1 \pm 0,1$ мм с формированием корня шва. Испытания прочности сварного шва при гидравлическом давлении 10 кг/см^2 в течение 5 минут подтвердили надежность сварного шва и его герметичность.

Таким образом, в данной статье описаны конструкции теплообменных элементов, выполненных в виде гладких труб, труб с искусственной шероховатостью стенок, а также витых труб типа «конфузор-диффузор» и пружинно-витых каналов, используемых в трубных пучках теплообменного оборудования. Для труб «конфузор-диффузор» и пружинно-витых каналов предложены векторно-параметрические уравнения, описывающие конфигурацию проточной части канала. Описаны традиционные технологии получения гладких труб, а также альтернативный способ их производства. Представляет практический интерес производство труб с использованием лазерной сварки и ротационнойковки в технологии получения труб высокого качества и заданной геометрии их проточной части.

Список литературы

1. Явнилович Е.Я. Трубы стальные, чугунные и балконы. – М.: Металлургия, 1966. – 371 с.
2. Бажан П.И., Канавец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 365 с.
3. Золотонос А.Я. Энергосбережение в технологии нагрева трансформаторного масла на основе активных методов интенсификации процессов теплообмена. // Дис... канд. техн. наук. – Казань, 2011. – 242 с.
4. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 371 с.
5. Патент № 119452 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотонос А.Я., Золотонос Я.Д., Багоутдинова А.Г., Осыка И.И. № 2012109355/06; заявл. 12.03.12.; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
6. Патент № 62694 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотонос А.Я., Золотонос Я.Д., Конахина И.А. № 2006143517/22; заявл. 07.12.06.; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12.
7. Патент № 109282 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотонос Я.Д., Осыка И.И., Никулин В.А., Фомин Н.А. № 2011117714/06; заявл. 01.04.11.; опубл. 10.10.2011. Бюл. № 28.
8. Патент № 119451 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотонос Я.Д., Мустакимова С.А., Багоутдинова А.Г. № 2012107373/06; заявл. 28.02.12.; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
9. Гортышев Ю.Ф., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. – Казань.: КГТУ, 1999. – 175 с.
10. Войнов Н.А., Николаев Н.А. Пленочные трубчатые газожидкостные факторы. – Казань.: Отечество, 2008. – 272 с.
11. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высшая школа, 2008. – 595 с.
12. Полухин П.И. Технология металлов и сварки. Элит, 2011. – 350 с.
13. Патент № 126812 на пол. модель РФ. Теплообменный элемент / Золотонос А.Я., Золотонос Я.Д., Гуков В.Н., Шарипов Н.М. № 2012142635/06, заявл. 05.10.12; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.
14. Грошиков А.И., Малафеев В.А. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении. – М.: Машиностроение, 1976. – 439 с.
15. Багоутдинова А.Г., Золотонос А.Я., Золотонос Я.Д., Сулимов Н.И., Яхнев М.Н. Математическое описание теплообменных поверхностей сложных каналов типа «конфузор-диффузор» // Известия КГАСУ, 2012, № 4 (22). – С. 204-208.
16. Чирков А.М., Князева И.А., Золотонос Я.Д., Багоутдинова А.Г. Применение лазерной сварки для производства кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

нового поколения на базе пружинно-витых каналов. // Известия КГАСУ, 2013, № 1 (23). – С. 154-158.

17. Чирков А.М., Князева И.А., Золотосов Я.Д. Технологические особенности лазерной сварки пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов. // Известия КГАСУ, 2012, № 4 (22). – С. 240-244.
18. Багоутдинова А.Г., Золотосов Я.Д., Мустакимова С.А. Геометрическое моделирование сложных поверхностей пружинно-витых каналов теплообменных устройств. // Известия КГАСУ, 2011, № 4 (18). – С. 185-192.

Bagoutdinova A.G. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Zolotonosov A.Ya. – candidate of technical sciences, engineer

Zolotonosov Ya.D. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Yakhnev M.N. – mechanical engineer radial forging plant

Ltd. «METCHIV»

The organization address: 454091, Russia, Chelyabinsk, Lenin st., 21 v, of. 613

Modern heat exchanger heat transfer elements equipment and manufacturing technology

Resume

This paper analyzes the design and manufacture of heat transfer components used in tube bundles of heat transfer equipment, including smooth pipes and pipes with artificial roughness of the walls, as well as the design of twisted tubes like «confuser-diffuser» and spring-twisted channels, previously protected by patents of the Russian Federation.

Special attention is given to the development of methods and technology of twisted pipes and channels using laser welding and rotary forging process.

The paper also shows the basic vector and parametric equations that describe the configuration of the flow tube «confuser-diffuser» and spring-twisted channels used in the hardware – software system to manage the process of manufacturing of pipes.

Described conventional technology for smooth pipes, as well as an alternative method of production.

Gives examples of twisted pipes made of stainless steel and carbon steel by rotary forging, and spring-twisted channels made using the technology of laser welding.

Keywords: twisted tube type «confuser-diffuser», spring-coiled channels, laser welding, rotary forging.

References

1. Yavnilovich E.Y. Steel pipes, iron and balcony. – M.: Metallurgy, 1966. – 371 p.
2. Bajans P.I., Kanevets G.E., Seliverstov V.M. Handbook of heat exchangers. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 368 p.
3. Zolotonosov A.J. Energy saving in heating technology of transformer oil based on active methods of intensification of teploobmennaya. // Dis ... Candidate. tech. Science. – Kazan, 2011. – 242 p.
4. Nazmeev J.G. Heat transfer in laminar flow in discrete channels of rough. – M.: Energoatomizdat, 1998. – 371 p.
5. Zolotonosov J.D., Osyka I.I., Bagoutdinova A.G. Heat exchanging element: Patent № 119452 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2012109355/06; Appl. 12.03.12.; publ. 20.08.2012. Byull. № 23.

6. Zolotonosov A.I., Zolotonosov J.D., Konahina I.A. Heat exchanging element: Patent № 62694 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2006143517/22; Appl. 07.12.06.; publ. 27.04.2007. Byull. № 12.
7. Zolotonosov J.D., Osyka I.I., Nikulin V.A., Fomin N.A. Heat exchanging element: Patent № 109282 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2011117714/06; Appl. 01.04.11.; publ.10.10.2011. Byull. № 28.
8. Zolotonosov Ya.D., Mustakimova S.A., Bagoutdinova A.G. Heat exchanging element: Patent № 119451 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2012107373/06; Appl. 28.02.12.; publ. 20.08.2012, Byull. № 23.
9. Gortichov Yu.F, Olimpiyev V.V. Heat exchange devices with improved heat transfer. – Kazan: Kazan state technical University, 1999. – 176 p.
10. Voinov N.A., Nikolaev N.A. Film tubular GLR. – Kazan.: Fatherland, 2008. – 272 p.
11. Fetisov G.P. Material Science and Technology of Metals. – M.: Vysshaya School, 2008. – 595 p.
12. Polukhin P.I. Metal processing and welding. Elite, 2011. – 350 p.
13. Zolotonosov A.J., Zolotonosov J.D., Gukov V.N., Sharipov N.M. Heat exchange element: Patent № 126812 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2012142635/06; Appl. 05.10.12.; publ. 04.10.2013, Byull. № 10.
14. Groshikov A.I., Malafeev V.A. Blank – stamping operation in aircraft. – M.: Engineering, 1976. – 439 p.
15. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov A.J., Zolotonosov J.D., Sulimov M.I., Yakhnev M.N. Mathematical description of the heat exchange surfaces of complex channels such as «confuser-diffuser» // Izvestia KGASU, 2012, № 4 (22). – P. 204-208.
16. Chirkov A.M., Knyazeva I.A., Zolotonosov Ya.D. Application of laser welding for shell and tube heat exchangers based on the new generation spring-twisted channels // News of the KSUAE, 2013, № 1 (23). – P. 154-158.
17. Chirkov A.M., Knyazeva I.A., Zolotonosov Ya.D. Technological features of laser welding of spring-twisted channels of heat exchangers // News of the KSUAE, 2012, № 4 (22). – P. 240-244.
18. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Mustakimova S.A. Geometrical modelling of complex surfaces of spring-twisted channels of heat exchangers // News of the KSUAE, 2011, № 4 (18). – P. 185-193.