

*В.Н. ПЕТРИВНИЙ, Ю.В. ТИМОФЕЕВ*

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СБОРКИ АГРЕГАТОВ СО ЗМЕЕВИКОВЫМИ СИСТЕМАМИ**

На основе анализа существующих методов изготовления агрегатов со змеевиковыми системами сформулированы новые принципы технологии формирования змеевиковых элементов из цельного куска оребренной трубы и складания змеевиковых систем. Их реализация позволила минимизировать объем, что занимает змеевикова система.

On the basis of the analysis of existing methods of manufacturing of units with serpentine systems new principles of technology ribbing pipes, formation serpentine elements from an integral piece ribbing pipes and assembly serpentine systems are formulated.

В агрегатах химической и нефтехимической промышленности, судовых энергетических установках, энергоблоках атомных электростанций, широко применяют змеевиковые системы. [1]. В настоящее время прогрессивные конструкции змеевиковых систем содержат преимущественно оребренную

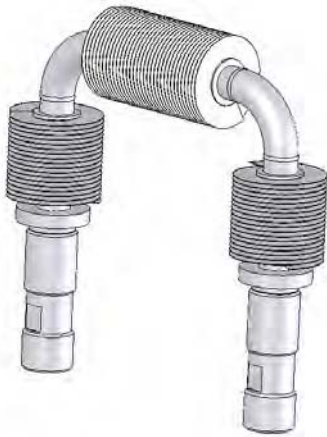


Рис. 1. Охладитель подшипникового узла насоса ЦНА 60-185, изготовленный по традиционной технологии

трубу, которую подвергают изгибу в плоский или пространственный змеевиковый элемент и прикрепляют к коллектору. Змеевиковые элементы на участке изгиба трубы и участках, прилегающих к зоне изгиба, не предусматривают оребрения или же ребра имеют низкую степень оребрения (рис.1). Это значительно снижает эксплуатационные характеристики таких систем и обуславливает увеличение их габаритов [2]. Кроме того, поперечное сечение змеевикового элемента в изогнутом участке приобретает форму овала и происходит утонение стенки на его внешней части. Змеевиковый элемент с искаженной формой поперечного сечения обладает меньшей прочностью, а также меньшей пропускной способностью, что снижает его надежность и эксплуатационные характеристики [3].

Как показывает практика производств, разрушение змеевиковых систем, изготовленных по традиционной технологии, в большинстве случаев связано с разрушениями в околосшовной зоне и на участках изгиба, вследствие утонения стенки трубы. Следующим существенным недостатком змеевиковых систем, изготовленных по традиционной технологии, является большая металлоемкость конструкций. Причем повышение металлоемкости в большей мере проявляется на стадии изготовления составных конструкций. Так при изготовлении участков изгиба до 50% материала заготовки идет в отходы.

Увеличение сроков службы агрегатов со змеевиковыми системами, напрямую зависит от повышения надежности змеевиковых элементов, и созданных на их базе змеевиковых систем.

Разработка новой технологии формирования змеевиковых элементов позволит повысить эффективность и надежность агрегатов со змеевиковыми системами. При этом требуемые эксплуатационные характеристики змеевиковых систем будут обеспечены с заданными геометрическими ограничениями, лимитированными по прочности, что, в свою очередь, позволит снизить металлоемкость, а следовательно, и себестоимость их изготовления. Поэтому разработка новой технологии формирования змеевиковых элементов является актуальной задачей.

Для выявления резервов повышения надежности и снижения металлоемкости змеевиковых систем разработаем математические модели структуры конструкции змеевикового элемента и технологии его изготовления.

Применительно к производству змеевиковых систем можно выделить следующие этапы: заготовительное производство, очистка, механообработка и сборка. При рассмотрении всех этапов во взаимосвязи, появляется возможность комплексно оценивать производственную технологичность в целом.

В основу математической модели структуры конструкции змеевикового элемента (ЗЭ) положены следующие принципы. Змеевиковый элемент представляет собой совокупность пространственно расположенных поверхностей  $\Pi$ :

$$\text{ЗЭ} = \{ \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j \}. \quad (1)$$

По расположению эти поверхности могут быть внутренними  $\Pi_{in}$  и внешними  $\Pi_{out}$ :

$$\Pi = \{ \Pi_{in}, \Pi_{out} \}. \quad (2)$$

Поскольку в качестве заготовки для змеевиковых элементов, как правило, используют трубу, то поверхности  $\Pi_{in}$  всегда будут являться отверстиями:

$$\Pi_{in} = \{ O_1, O_2, \dots, O_n \}. \quad (3)$$

Поверхности  $\Pi_{out}$  могут являться поверхностями гладкой трубы, оребренной, а также совокупностью гладких и оребренных поверхностей

$$\Pi_{out} = f(\Gamma_T, O_T) = \{\Gamma_T \vee O_T\}. \quad (4)$$

Рассматривая гладкую трубу в качестве заготовки, внешние поверхности змеевикового элемента можно представить совокупностью гладких цилиндрических поверхностей (на прямолинейных участках) и торообразных (на участках изгиба):

$$\Pi_{out}(\Gamma_T) = \{\Pi_{ц}, \Pi_{т}\}. \quad (5)$$

Приняв в качестве заготовки оребренную трубу, внешние поверхности змеевикового элемента можно представить совокупностью прямолинейных винтовых поверхностей и изгибов винтовых поверхностей:

$$\Pi_{out}(O_T) = \{B_{\Pi}, B_{\Gamma}\}. \quad (6)$$

Из совокупности винтовых поверхностей можно выделить поверхности выступов, поверхности впадин и боковые поверхности:

$$\{B_{\Pi} \wedge B_{\Gamma}\} \in \{B^{выс}, B^{вп}, B^{\beta}\}.$$

Гладкие поверхности связаны между собой геометрическими параметрами:

$$\Pi_{out}(\Gamma_T) = f(D, t, l, \alpha), \quad (7)$$

где  $D$  – наружный диаметр трубы;  $t$  – толщина стенки трубы;  $l$  – длина заготовки трубы;  $\alpha$  – угол изгиба змеевикового элемента.

$$\Pi_{out}(O_T) = \{D_n, D_{вн} = d_n, d_{вн}, l, \Delta, S, \beta\}. \quad (8)$$

Кроме того, каждая поверхность, независимо от расположения, обладает рядом физических, точностных и качественных параметров:

$$\Pi_j = f(\sigma_B, НВ... IT... R_a...). \quad (9)$$

Если в выражение (1) подставить все последующие выкладки, то получим математическую модель змеевикового элемента, которая хорошо согласуется с теорией графов. Тогда любую конструкцию ЗЭ можно представить в виде графа, где вершинами будут поверхности, а ветвями – их физические, точностные и качественные параметры. Поскольку каждая ветвь графа включает в себя несколько параметров, то для того, чтобы каждая вершина имела ветвь, которой соответствовало бы единственное значение параметра, необходимо граф ЗЭ представить в виде многомерного графа. Этот гиперграф будет иметь ряд взаимосвязанных между собой отдельных графов меньшего порядка, количество которых соответствует максимальному количеству параметров среди рассматриваемых вершин. Следовательно, каждая отдельная конструкция представляет собой граф ЗЭ (рис. 2.) вершинами которого являются поверхности, а их ветви – физические, точностные и качественные параметры каждой рассматриваемой вершины.

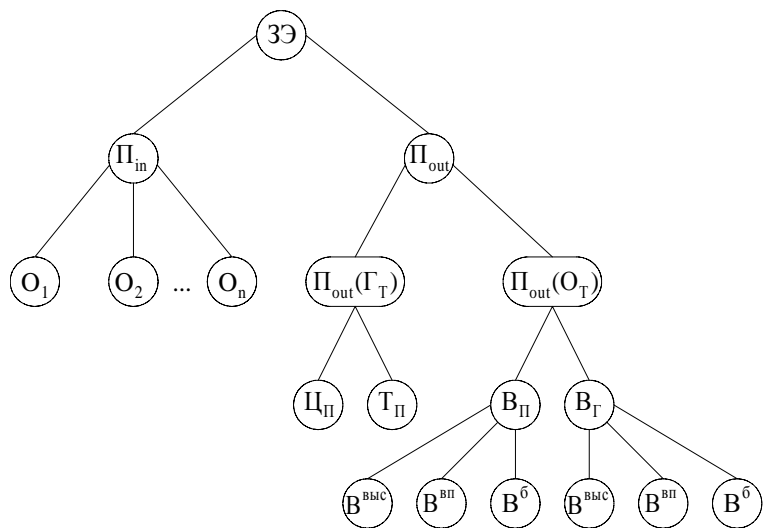


Рис. 2. Граф структуры конструкции змеевикового элемента

Структура технологии изготовления змеевикового элемента будет состоять из технологий получения отдельных поверхностей деталей и технологии сборки полученных деталей в готовое изделие.

Технология изготовления змеевиковой системы состоит из 16 операций (табл.1), и представляет собой технологический процесс, в котором задействовано 3 метода механической обработки. В каждый этап включаются однородные по характеру методы обработки различных поверхностей, выполняемых последовательно. Внутри каждого этапа формируются группы укрупненных операций для обработки основных поверхностей, устанавливается рациональная последовательность укрупненных операций одинакового ранга. Укрупненные операции дифференцируются на простые и определяется последовательность их выполнения.

На рис.3 для произвольной конструкции змеевикового элемента показано размещение промежуточных состояний элементарных поверхностей. В конструкции рассматриваемого змеевикового элемента можно выделить по одному типоразмеру прямолинейных участков оребренных труб и изгибов гладких труб. Круглые вершины графа соответствуют гладким поверхностям, а квадратные – оребренным. На каждом этапе может осуществляться обработка нескольких типоразмеров заготовок, что находит отображение в графе. Так, количество заготовок гладких труб может изменяться от 0 до  $i$ , количество заготовок труб, подлежащих оребрению – от 0 до  $j$ . Согласно табл.1 в конструкции рассматриваемого змеевикового элемента можно выделить по одному

типоразмеру прямолинейных участков оребренных труб и гибов гладких труб.

Таблица 1

Этапы производственного процесса изготовления и сборки змеевиковой системы

Номер этапа/ операции	Наименование этапов/операций	Назначение и характеристика этапов
<b>Э1 ПОДГОТОВКА ГЛАДКОЙ ТРУБЫ</b>		
01	Заготовительная	Получение заготовки
02	Моечная	Предварительная очистка (расконсервация) заготовки
03	Отрезная	Формирование заготовок установленной длины
04	Гибочная	Формированиегиба трубы
05	Отрезная	Формирование ЗЭ установленных размеров
06	Слесарная	Подготовка торцов для последующей операции
<b>Э2 ПОДГОТОВКА ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ</b>		
01	Заготовительная	Получение заготовки
02	Моечная	Предварительная очистка (расконсервация) заготовки
03	Отрезная	Резка заготовки на мерные куски с напуском
04	Накатная	Накатка оребрения
05	Отрезная	Формирование заготовок установленной длины
06	Слесарная	Подготовка торцов для последующей операции
<b>Э3 СБОРКА ЗМЕЕВИКОВОГО ЭЛЕМЕНТА</b>		
01	Гальваническая	Заключительная очистка (осветление) изделия
02	Термическая	Подогрев соединяемых деталей
03	Сварочная	Сборка деталей в изделие
04	Слесарная	Зачистка сварных швов, удаления наплыва металла

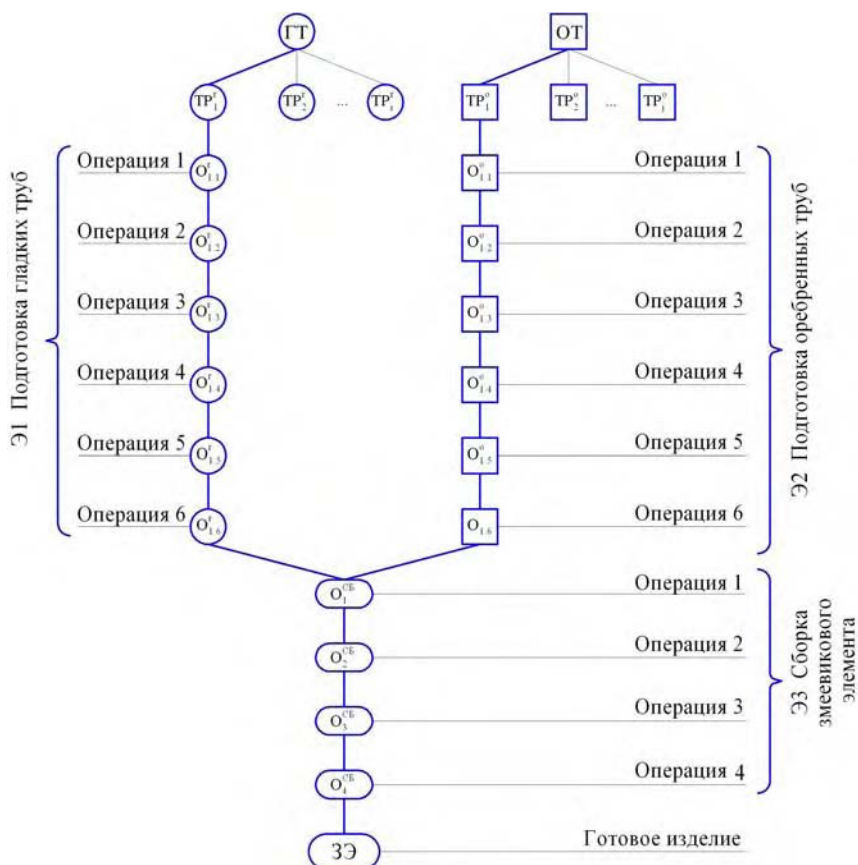


Рис. 3 Граф структуры конструкции змеевикового элемента в производственном цикле

Таким образом, змеевиковая система может состоять из нескольких змеевиковых элементов, совокупности прямых труб и змеевиковых элементов или сложного змеевикового элемента, имеющего несколько изгибов в одной или нескольких плоскостях.

На этапе синтеза рационального варианта технологии изготовления змеевиковой системы необходимо учитывать ограничения по ее реализации. Рассмотрим принцип формирования ограничений. Синтез рационального варианта (рис. 4) состоит из нескольких этапов.

Из совокупности существующих конструкций змеевиковых систем выбирается множество вариантов:

$$Z = \bigcap_{\phi \in A} z_{\phi}, \text{ где } A = \{1, 2, \dots, \psi\}.$$

На следующем этапе рассматривается совокупность существующих

комбинаций отдельных элементов, присутствующих в змеевиковой системе из которых формируется множество вариантов:

$$Q = \prod_{\omega \in B} q_{\omega}, \text{ где } B = \{1, 2, \dots, \zeta\}.$$

Далее, по каждому варианту комбинации элементов змеевиковой системы формируется множество способов их получения (рис. 2.13):

$$P = \prod_{\tau \in C} p_{\tau}, \text{ где } C = \{1, 2, \dots, \vartheta\}.$$

Следующий этап - поиск реализации данных методов средствами технологического оснащения с учетом множества вариантов существующего оборудования:

$$O = \prod_{\chi \in D} o_{\chi}, \text{ где } D = \{1, 2, \dots, \upsilon\}.$$

Результатом поиска является совокупность технологических процессов:

$$X = \prod_{\sigma \in F} x_{\sigma}, \text{ где } F = \{1, 2, \dots, l\}.$$

Формирование множества технологических процессов происходит согласно условия:

$$X = Z \cup Q \cup P \cup O.$$

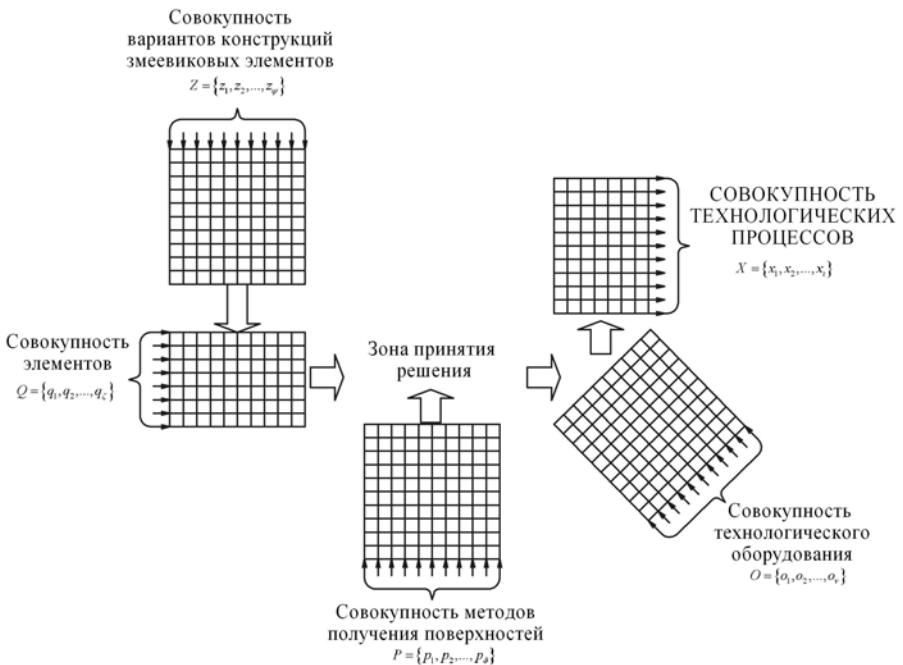


Рис. 4. Схема синтеза рационального варианта технологии изготовления змеевиковой системы

Исходя из этого возможность реализации технологической задачи можно описать выражением:

$$\exists x_{\sigma} = \left[ \bigcap_{\phi \in A} z_{\phi} \right] \cup \left[ \bigcap_{\omega \in B} q_{\omega} \right] \cup \left[ \bigcap_{\tau \in C} p_{\tau} \right] \cup \left[ \bigcap_{\chi \in D} o_{\chi} \right].$$

В качестве критерия выбора рационального варианта используется надежность изделия:

$$x^{opt} = \bigcap_{\sigma \in F} x_{\sigma} \Rightarrow N^{max}.$$

На этапе синтеза рационального варианта технологии изготовления змеевиковой системы рассматриваются все возможные варианты технологических процессов изготовления змеевиковой системы. Тот вариант технологического процесса, который останется базовым после рассмотрения всех возможных вариантов изготовления змеевиковых элементов и их сборки в змеевиковую систему и будет рациональным вариантом технологического процесса изготовления змеевиковой системы для данных производственных условий.

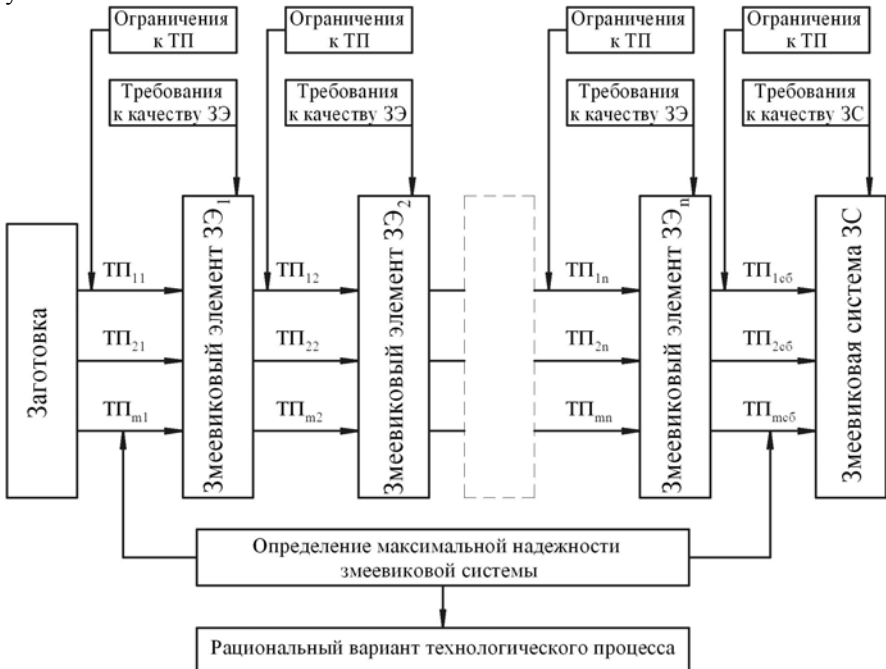


Рис. 5. Модель направленного выбора варианта технологического процесса и изготовления змеевиковой системы по максимальной надежности

Поиск рационального варианта осуществляется следующим образом. Из заготовки наиболее рациональным технологическим процессом формируется



змеевиковый элемент  $ЗЭ_1$ . При этом существует ряд ограничений к технологическому процессу и требований к качеству змеевикового элемента. Технологических процессов, с помощью которых можно получить слой  $ЗЭ_1$  может быть несколько, поэтому выбираем в первом приближении тот технологический процесс, который обеспечивает минимальную металлоемкость змеевикового элемента. Далее изготавливается змеевиковый элемент  $ЗЭ_2$ ,  $ЗЭ_n$ . При этом необходимо выдерживать требования к качеству поверхностей змеевиковых элементов и ограничения к технологическим процессам получения этих поверхностей. В конце осуществляют сборку змеевиковой системы и получают змеевиковую систему с заданными технологическими свойствами. Определяется эксплуатационная надежность змеевиковой системы и данный вариант технологического процесса принимается за базовый. После этого возвращаются на начало проектирования технологического процесса и выбирают технологический процесс получения змеевикового элемента  $ЗЭ_1$ , который имеет большую металлоемкость, чем в базовом варианте, учитывая ограничения к технологическим процессам и требования к качеству его поверхностей.

Рассматривается вся цепочка получения змеевикового элемента с заданными технологическими свойствами. Рассчитывается эксплуатационная надежность змеевиковой системы, полученной соответствующим технологическим процессом изготовления змеевикового элемента. Сравняется текущая надежность с базовым вариантом. Если текущая надежность выше, то ее принимают как базовую.

Как показали теоретические расчеты, максимальной надежностью в совокупности с минимальной металлоемкостью обладают змеевиковые системы, сформированные из цельного куска оребренной трубы. Для подтверждения теоретических разработок были проведены прочностные исследования змеевиковых элементов.

На первом этапе производились аналитические расчеты на прочность гладких труб. На втором этапе проводились натурные испытания серии из 10 образцов каждого типоразмера до разрушения. На третьем этапе разработаны твердотельные ассоциативные модели труб и осуществлена имитация и расчет имитационной модели нагружения на ЭВМ. Моделирование было реализовано в системе автоматизированного проектирования SolidWorks, для анализа напряжений использовалось приложение COSMOSWorks.

Далее проводились исследования оребренных труб. Имитация нагружения оребренных труб на ЭВМ осуществлялась в два этапа. На первом этапе создавались твердотельные модели труб, аналогичные подверженному натурным испытаниям, и проверялась адекватность разработанных моделей. Поскольку отклонение экспериментальных данных от результатов, полученных на ЭВМ, лежит в пределах  $\pm 5\%$ , то компьютерную модель считаем адекватной и дальнейшее исследование оребренных труб проводим на ЭВМ. Для выяснения характера влияния оребрения на прочность трубы создавались твердотельные модели оребренных труб, имеющие одинаковый

внутренний диаметр и толщину стенки и отличающиеся высотой оребрения для каждого типоразмера. Трубы подвергались воздействию внутреннего давления величиной 20 МПа. При этом фиксировалось максимальное эквивалентное напряжение на стенке трубы. По результатам проведенных испытаний установлено, что оребрение оказывает подкрепляющий эффект на поверхности трубы любого типоразмера а следовательно, способствует повышению надежности змеевиковой системы в целом.

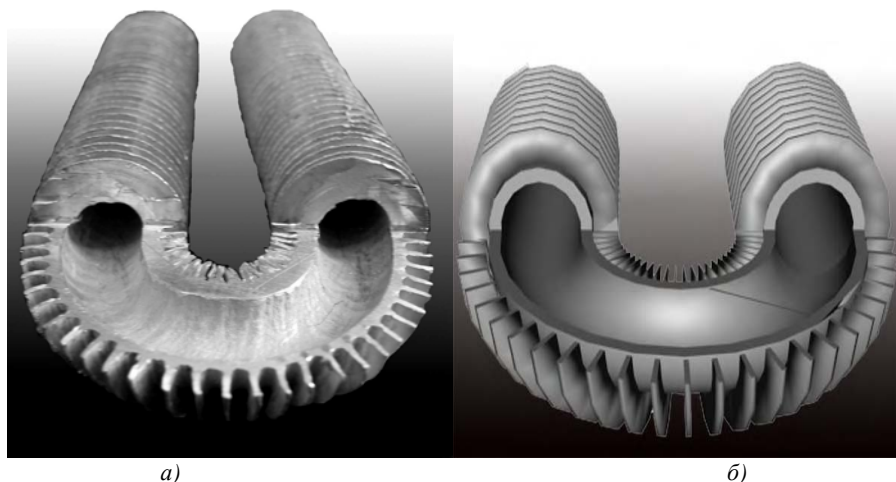


Рис. 4. Образцы змеевиковых элементов с минимальным радиусомгиба  
*а* – фотография натурального образца; *б* – компьютерная модель змеевикового элемента

Заданные геометрические ограничения, лимитирующие по прочности змеевикового элемента, позволили установить, что при увеличении металлоемкости змеевикового элемента на 10%, за счет формирования оребрения, его прочность повышается на 30...40%. Таким образом, формирование оребрения позволяет повысить эксплуатационные характеристики змеевиковых систем и уменьшить их металлоемкость в 3...4 раза.

Список литературы: 1. Ремнев А.И., Петривный В.Н. Новая технология гибки монометаллических цельнооребрённых труб из цветных металлов // Вестник национального технического университета „ХПИ“ №19, 2002. с. 7 – 14. 2. Петривный В.Н., Ремнев А.И. Оценка качества изгиба оребренных монометаллических труб для компрессорных систем теплообмена // Компрессорное и энергетическое машиностроение.- Сумы. 2007- № 3 с.67-70. 3. Гальперин А.И. Машины и оборудование для гнутья труб. Изд-е 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1967, 182с.

*Поступила в редакцию 11.12.08*