

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-14-34



УДК 621.7.04; 621.91; 621.565.93/95

UDC 621.7.04; 621.91; 621.565.93/95

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

## INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF DEFORMATION CUTTING METHOD FOR THE INNER SURFACE ENHANCING OF HEAT EXCHANGE TUBES

✉<sup>1</sup> **Зубков Николай Николаевич**, д.т.н., проф. кафедры инструментальной техника и технологии, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: [zoubkovn@bmstu.ru](mailto:zoubkovn@bmstu.ru)

✉<sup>1</sup> **Zubkov Nikolai Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor of the department of instrumental engineering and technology, Bauman Moscow state technical university, Moscow, e-mail: [zoubkovn@bmstu.ru](mailto:zoubkovn@bmstu.ru)

**Аннотация.** Представлен анализ существующих методов внутритрубной интенсификации теплообменных процессов. Предложены апробированные варианты использования метода деформирующего резания для развития внутренней поверхности теплообменных труб, включающие принципы, схемы реализации, конструкции инструментов и приспособлений. Приведены фотографии получаемых внутри труб макроструктурированных поверхностей и интенсификаторов теплообмена для повышения эффективности конвективного и конденсационного теплообмена, а также пузырькового кипения.

**Annotation.** The analysis of existing methods of surface enhancing for in-tube intensification of heat-exchange processes is presented. Approved variants of using the method of deformational cutting for the increasing the inner surface of heat-exchange tubes are proposed, including principles, schemes of realization, designs of tools and attachments. Photos of macrostructured surfaces and heat exchange intensifiers obtained inside the tubes to increase the efficiency of convective, condensing and boiling heat transfer is presented.

**Ключевые слова:** ДЕФОРМИРУЮЩЕЕ РЕЗАНИЕ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА, ТЕПЛООБМЕННАЯ ТРУБА, ВНУТРЕННЕЕ ОРЕБРЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТЬ КИПЕНИЯ, ПОВЕРХНОСТЬ КОНДЕНСАЦИИ.

**Keywords:** DEFORMATIONAL CUTTING, HEAT TRANSFER ENHANCEMENT, INNER TUBE FINNING, ENHANCED HEAT TRANSFER SURFACES.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсификация теплообмена для теплообменных аппаратов на основе труб достигается развитием их теплообменных поверхностей или созданием интенсификаторов теплообменных процессов. На практике наибольшее распространение получило развитие наружной

поверхности теплообменных труб за счет оребрения. Однако, увеличение площади наружной теплообменной поверхности, при гладкой внутренней поверхности, например, в 10 раз, приводит к увеличению коэффициента теплопередачи менее, чем в два раза. Аналогичного повышения тепловой эффективности можно достичь, увеличивая одновременно в два раза площадь как наружной, так и внутренней поверхности. Внутреннее развитие поверхности труб или создание на ней интенсификаторов теплообмена является перспективным направлением повышения эффективности теплообменных аппаратов и снижения их металлоемкости, однако является сложной технологической задачей [1].

Макро- или микрорельеф на внутренней поверхности труб позволяет повысить компактность и эффективность теплообменных аппаратов. Его использование целесообразно в теплообменных аппаратах промышленных холодильных, кондиционирующих и криогенных установок, теплообменниках для химической промышленности и тепловых станций, воздухонагревателей, конденсаторов погружного охлаждения электронной техники и т.п.

Ведущие зарубежные производители теплообменной аппаратуры применяют в своих изделиях теплообменные трубы с внутренним рифлением с количеством спиральных ребер (канавок) по окружности от 2-х до 60 и углом наклона канавок к оси до 60°. Высота макрорельефа составляет обычно десятые доли миллиметра, что не позволяет увеличивать площадь внутренней теплообменной поверхности более, чем на десятки процентов. Основной целью создания такого макрорельефа является интенсификация теплообмена за счет разрушения пристеночного слоя при закручивании потока, проходящего через винтовые выступы.

Существует ограниченное количество методов получения внутреннего макрорельефа, которые можно отнести к обработке резанием и обработке давлением.

Развитие поверхности в виде оребрения методами лезвийной обработки используется крайне редко, ввиду невысокой производительности, наличием отходов в виде стружки и малым диапазоном типоразмеров получаемого внутреннего рельефа.

Получение труб с внутренним макрорельефом из лент основано на предварительной накатке макрорельефа на ленте рифлеными роликами или гофрировании ленты. В дальнейшем из ленты формируется трубная заготовка с последующей прямой или спиральной шовной сваркой. Получение труб из ленточных заготовок можно условно отнести к сборочным методам. На практике используются способы по патентам США [2-4] и др.

Для получения макрорельефа на внутренней поверхности труб в подавляющем большинстве случаев используются высокопроизводительные методы обработки давлением, однако, это обуславливает необходимость применения специализированного дорогостоящего оборудования.

При получении канавок на уже готовой трубе известно использование дорнования. Рифления на формообразующей поверхности дорна продавливают канавки на внутренней поверхности трубы. Дорн устанавливается на штанге и вытягивается из трубы.

Оригинальным является формирование внутреннего рельефа “плавающим” дорном, не требующим штанги для удержания дорна внутри трубы [5]. Дорн состоит из двух частей (рис. 1). Отсутствие осевого перемещения дорна при протягивании трубной заготовки обеспечивается гладкой частью 1 и фильерой 3, редуцирующими трубу. Рифленая часть дорна 2 совместно с фильерой 4 формирует канавки на внутренней поверхности трубы.

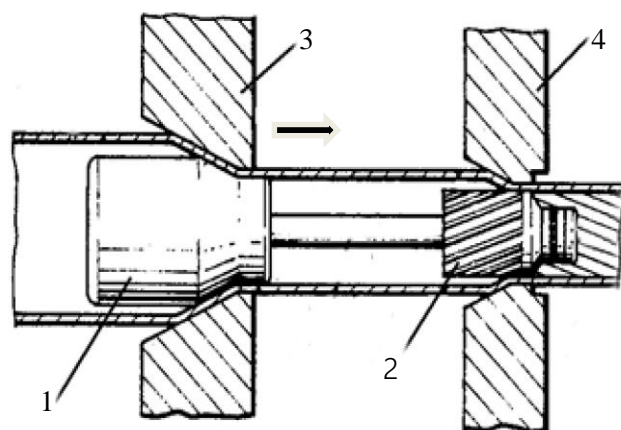


Рисунок 1 – Формирование внутреннего макрорельефа “плавающим” дорном

Силы, необходимые для протягивания трубы значительны, что требует обильной смазки. Имеются модификации этого метода, для снижения силы волочения, когда вместо фильера 3 и 4 используется обкатка шариками или роликами, расположенными в обойме. В силу ряда технологических проблем, часто приводящих к разрыву трубной заготовки, метод используется ограниченно.

Наибольшее распространение получило создание ребер на внутренней поверхности уже готовых бесшовных труб одновременно с формированием наружного оребрения. Используется метод накатки наружных ребер блоком дисковых роликов при обжатии трубы на внутреннюю оправку, имеющую винтовые углубления (рис. 2). Наиболее характерными являются способы, отраженные в патентах [6, 7].

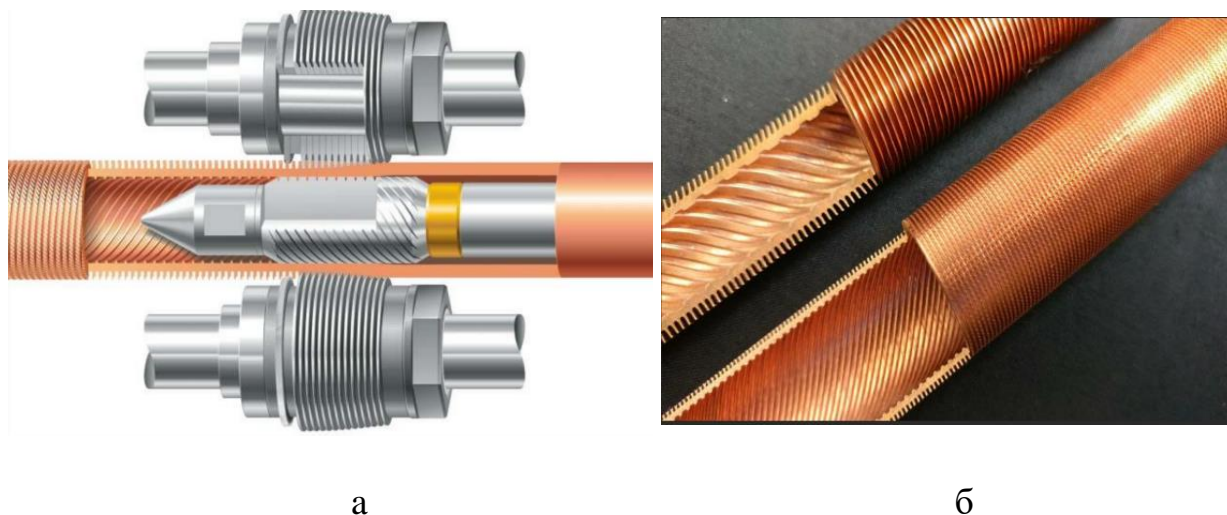


Рисунок 2 – Схема одновременного структурирования наружной и внутренней поверхности теплообменной трубы (а) и примеры получаемых рельефов (б) [8]

Также применяется прессование трубной заготовки пропусканием через фильеру с формированием продольных, реже спиральных внутренних ребер (рис. 3). Метод применим только для труб из алюминиевых сплавов [9].

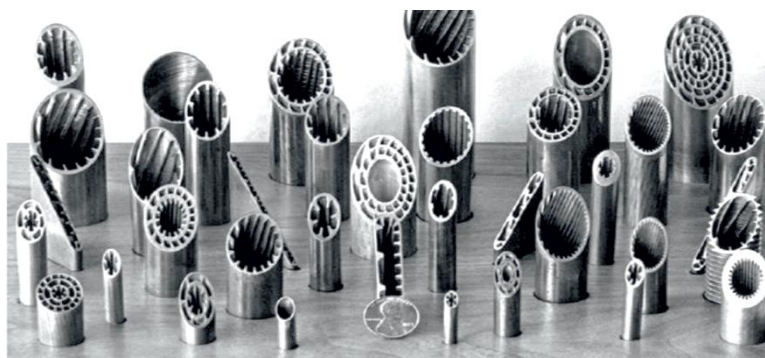


Рисунок 3 – Внутреннее оребрение алюминиевых труб, полученное экструдированием [9]

Трубы с волнистыми спиральными поверхностями формируются блоком наружных роликов [10]. Примеры спирально-профильных труб приведены на рис. 4.



Рисунок 4 – Спирально-профильные трубы

Наружные и внутренние спиральные выступы способствуют завихрению потока, ведущего к разрушению пограничного слоя, что уменьшает тепловое сопротивление и повышает коэффициент теплоотдачи [11]. Увеличение площади внутренней поверхности также повышает коэффициент теплоотдачи [12, 13].

Технологией, позволяющей варьировать параметрами получаемого макрорельефа в широком диапазоне типоразмеров, является технология деформирующего резания (ДР). Метод ДР успешно используется для наружного развития поверхности труб теплообменных аппаратов. МГТУ им. Н.Э. Баумана поставляло и поставляет монометаллические оребренные трубы из меди, титана, коррозионностойких и низколегированных сталей, мельхиора и алюминиевых сплавов десяткам предприятий, производящим теплообменную аппаратуру. Целью настоящего исследования является анализ возможностей использования метода деформирующего резания для получения теплообменного макрорельефа на внутренней поверхности теплообменных труб, а также проработка вариантов технической реализации, включающей схемы, инструмент и технологическую оснастку для осуществления предлагаемых методов.



## 2 Материалы и методы

Получение макрорельефов на внутренних поверхностях теплообменных труб с использованием метода ДР возможно по следующим вариантам:

2.1 Получение поперечного оребрения внутри трубы с использованием классической схемы ДР с подрезанием поверхностного слоя и его пластического деформирования в объем ранее образованной канавки. Возможности получения типоразмеров полученного оребрения будут практически соответствовать возможностям мелкошагового наружного оребрения, получаемого методом ДР [14]. Для внутреннего поперечного оребрения технологическими проблемами являются нежесткость инструмента, расположенного внутри трубы, и нерешенность технической реализации ввода и вывода инструмента на заданную глубину резания в процессе обработки внутренней поверхности для получения неоребранных участков в начале и конце трубы.

2.2 Использование метода ДР для получения продольного или спирального многозаходного оребрения внутри труб. В этом случае классический вариант использования метода ДР требует многозубого инструмента в виде протяжки. Количество режуще-деформирующих зубьев с геометрическими параметрами инструмента для ДР должно соответствовать требуемому количеству продольных канавок по длине окружности внутреннего диаметра. Проблемой также является возможность получения неоребранных участков а начале и конце трубы, а также большие осевые усилия на инструмент и заготовку от воздействия одновременно работающих режуще-деформирующих зубьев.

2.3 Формирование методом пластического деформирования неглубоких продольных рисок с последующим формированием поперечного оребрения внутри трубы. Неглубокие риски глубиной около 0,1 мм являются концентраторами напряжения, что приводит в процессе ДР к разрыву ребра по его длине с формированием теплообменной поверхности в виде штырьков. Штырьковые структуры перспективны как для интенсификации конвективного теплообмена, так и для повышения коэффициента теплоотдачи при конденсации на них паров теплоносителя.

2.4 Формирование методом пластического деформирования выступов с последующим формированием методом ДР поперечного оребрения внутри трубы, что приводит к формообразованию полноценной штырьковой структуры.

2.5 Использование ленты, оребренной методом ДР для последующего формирования герметичной трубы с внутренним микрорельефом.

2.6 Формирование одного или нескольких винтовых выступов-нарезов принудительно вращающимся или самовращающимся инструментом для ДР.

## 3 Результаты исследований

Рассмотрим более подробно технические особенности реализации вышеозначенных пунктов.

Получение поперечного внутреннего оребрения методом ДР по пункту 2.1 имеет ограниченное практическое значение для конвективного теплообмена, поскольку достаточно узкий межреберный зазор расположен перпендикулярно течению теплоносителя, который физически не может огибать боковые стороны ребер. Однако, в случае использования такой поверхности для внутритрубного кипения, поперечное оребрение может дать существенные преимущества, в первую очередь, связанные с многократным увеличением площади поверхности кипения и деформацией паровых пузырей в узком межреберном зазоре, значительно увеличивая коэффициент теплоотдачи и критические плотности теплового потока.

Этот вариант достаточно прост в реализации как для одно-, так и для многовершинного инструмента при ДР с получением одно- или многозаходного оребрения. Особенности получения многозаходного наружного оребрения описаны в работе [15]. На рис. 5 представлены

варианты одно-, двух- и четырехвершинного инструмента для получения внутреннего поперечного оребрения. Каждая из вершин режуще-деформирующей пластины заточена с геометрией инструмента для ДР. В качестве заготовок для заточки инструмента предлагается использовать стандартные сменные многогранные твердосплавные пластины. Э

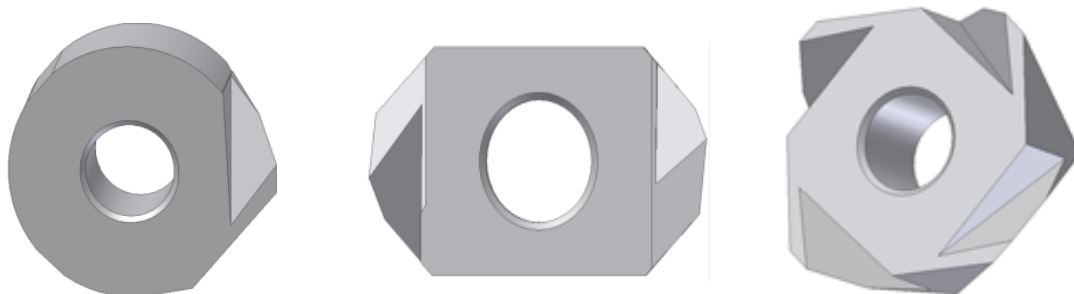


Рисунок 5 – Одно-, двух- и четырехвершинный инструмент ДР для внутреннего поперечного оребрения

Технически поперечное внутреннее оребрение для коротких трубных заготовок может быть реализовано при вращении трубной заготовки в шпинделе токарного станка и закреплении штанги с инструментом для ДР в пиноли задней бабки. Движение подачи инструмента осуществляется продольным суппортом, отодвигающим незакрепленную заднюю бабку.

Для длинномерных труб целесообразно движение подачи осуществлять трубной заготовкой при вращательном движении штанги с инструментом. На рис. 6 представлена такая схема реализации получения поперечного однозаходного оребрения 1 внутри трубной заготовки 2 одновершинным инструментом 3. Трубная заготовка 2 получает поступательное движение от ведущих роликов 4. Инструмент 3 для ДР имеет вращательное движение через штангу 5 от отдельного привода с регулируемым числом оборотов. Опорная втулка 6 со скользящей посадкой по внутреннему диаметру трубной заготовки компенсирует радиальные усилия при ДР, обеспечивая постоянство глубины ДР.

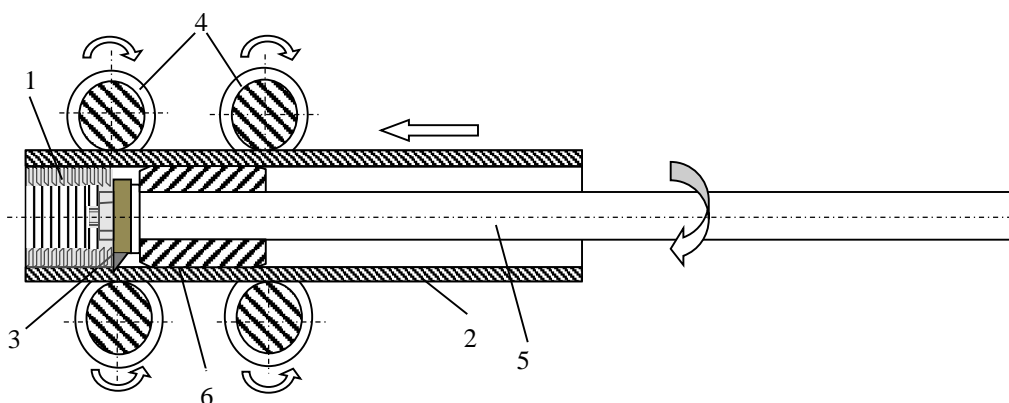


Рисунок 6 – Схема получения поперечного внутреннего оребрения внутри трубы.

Проработана принципиальная схема устройства подачи трубной заготовки с двумя парами металлических обрезиненных роликов, представленная на рис. 7. Привод состоит из электродвигателя 1, червячного редуктора 2, двух пар роликов 3 и двух пневмоцилиндров 4 осуществляющих сжатие роликами трубной заготовки.

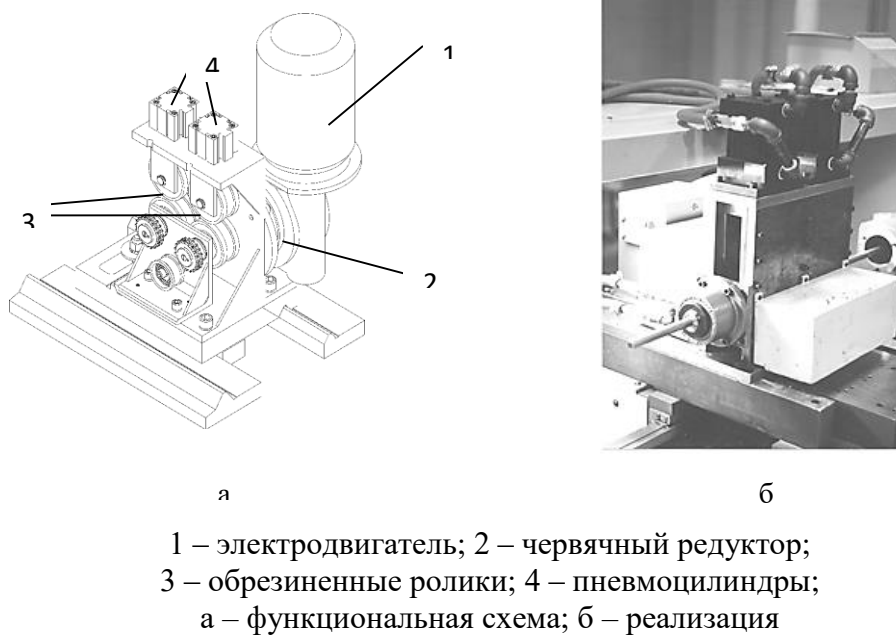
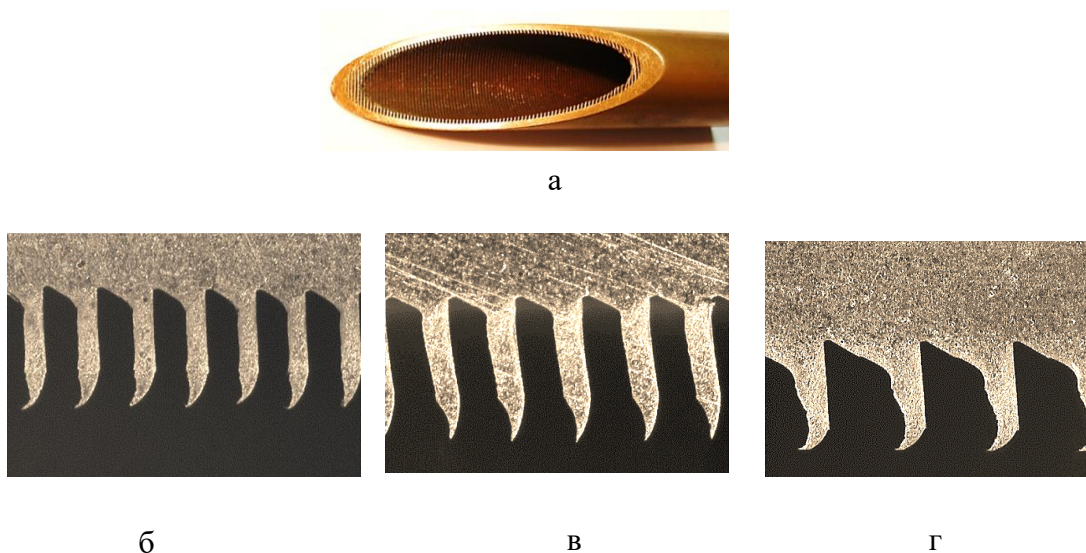


Рисунок 7 – Устройство подачи трубной заготовки с двумя парами металлических обрезиненных роликов

Фотографии внутриребренной трубы и срезов поперечного внутреннего однозаходного оребрения представлены на рис. 8. Увеличение площади внутренней теплообменной поверхности после обработки составило 5,9 (рис. 8, б) и 5,3 раза (рис. 8, в).



- а) наружный диаметр трубы 19,0 мм, шаг оребрения 0,5 мм; высота ребер 0,8 мм;  
б) шаг ребер 0,42 мм, высота ребер 1,0 мм;  
в) шаг ребер 0,6 мм, высота ребер 1,3 мм;  
г) шаг ребер 0,85 мм, высота ребер 1,0 мм

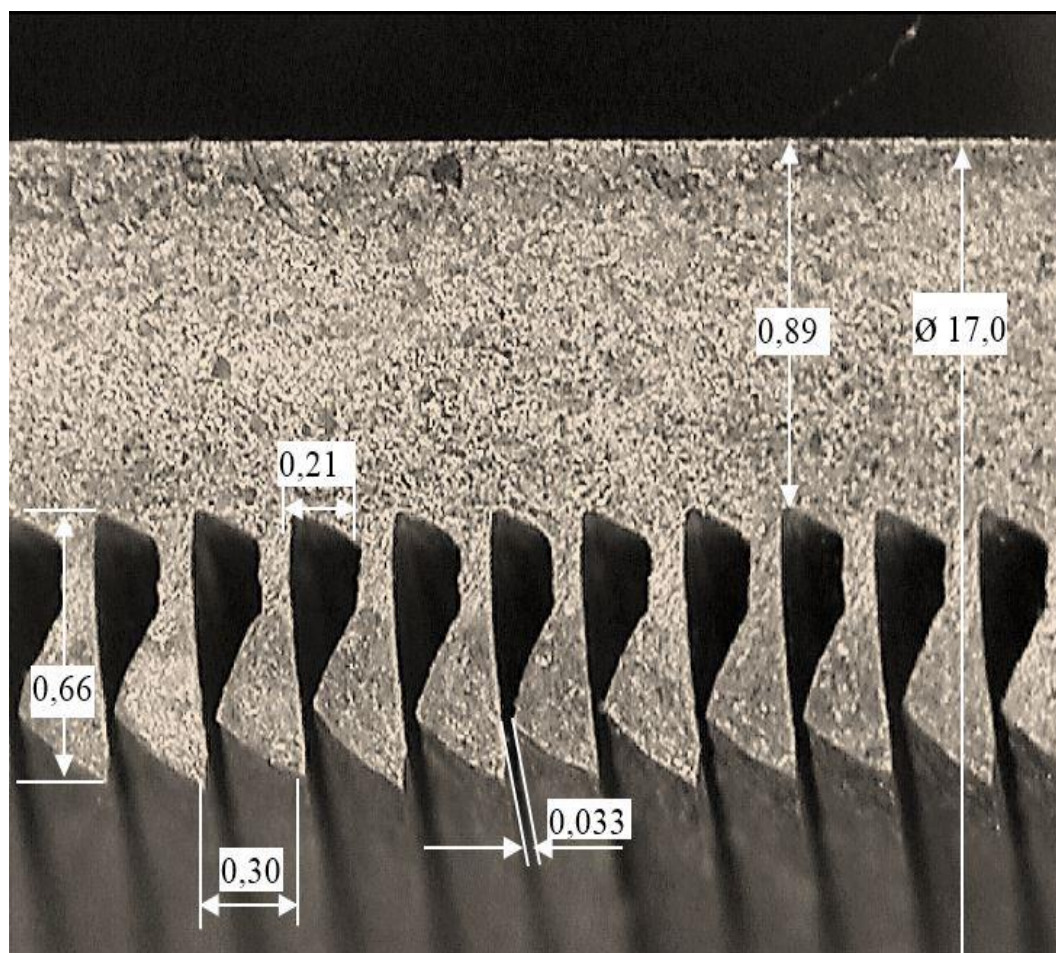
Рисунок 8 – Срезы внутреннего поперечного оребрения, полученные методом ДР по п. 2.1 на меди М2



Для интенсификации пузырькового кипения перспективным является использование оребрения с внутренними подповерхностными полостями [16, 17]. Принципы получения подповерхностных полостей методом ДР описаны в [18]. Одним из вариантов является их получение инструментом со ступенчатой режущей кромкой. Вариант внутреннего оребрения использования такого инструмента для получения подповерхностных полостей представлен на рис. 9.

Для получения внутри трубы продольных или спиральных ребер методом ДР по пункту 2.2 предлагается использовать сборную многозубую режуще-деформирующую протяжку (рис. 10) с геометрическими параметрами режущего клина инструмента для ДР. В качестве заготовок для заточки режцовых частей протяжки предложено также использование стандартных четырехгранных твердосплавных пластин. Основой данного инструмента является сборка четырехзубых пластин, закрепленных на оправке. Все режущие элементы в данном инструменте имеют идентичную геометрию и повернуты на один и тот же угол относительно друг друга. Таким образом, обеспечивается равномерность распределения получаемых ребер по внутренней поверхности трубы.

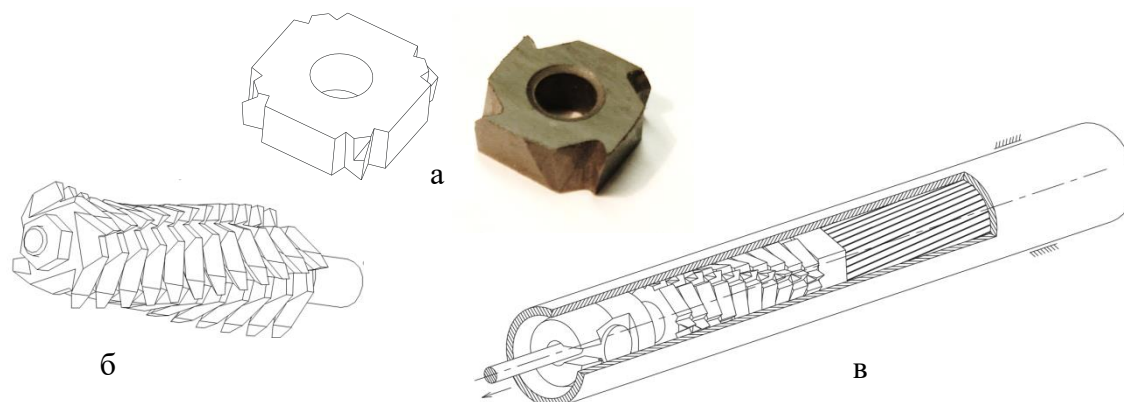
Апробирована протяжка из 12 режуще-деформирующих четырехзубых пластин, которая позволяет получать на внутренней поверхности трубы с 48 ребрами по длине окружности при однократном осевом перемещении протяжки внутри трубы.



Медь М1. Начальная толщина стенки трубной заготовки 1,2 мм

Рисунок 9 – Подповерхностные паровые полости для интенсификации пузырькового кипения на внутренней стороне трубы [18]

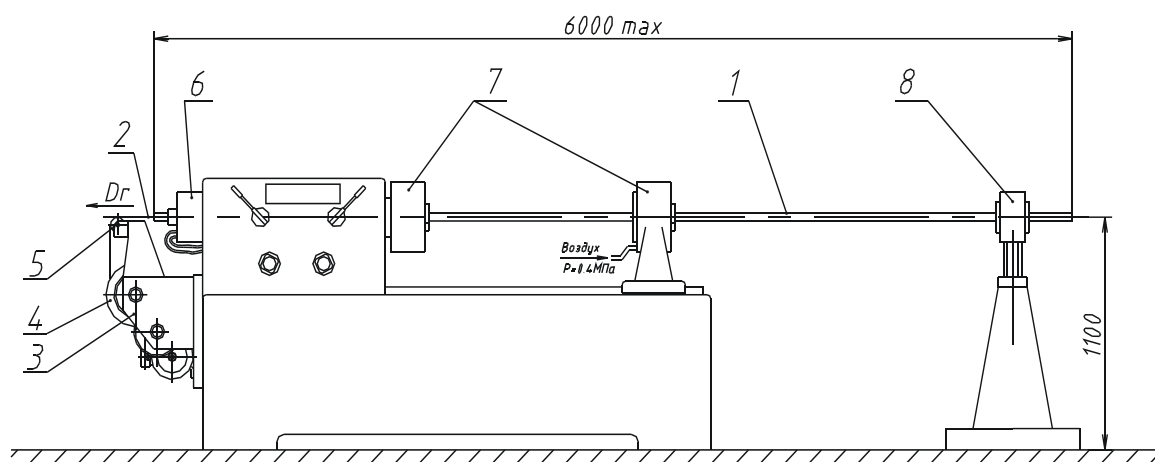




- а) модель и реальный режуще-деформирующий элемент протяжки;  
 б) блок режуще-деформирующих элементов протяжки в сборе;  
 в) формирование продольных ребер внутри трубы протяжкой

Рисунок 10 – Протяжка для получения продольных или спиральных ребер внутри трубы

Движение протяжки внутри трубы предлагается осуществлять тросом, пропущенным внутри трубы. Схема обработки показана на рис. 11. Установка выполнена на базе токарного станка и использует большую часть его элементов. Данный выбор был сделан ввиду широкой распространенности токарных станков, как вида оборудования и отсутствия необходимости кардинальной переделки токарного станка для использования его в качестве основы для установки внутреннего оребрения труб.



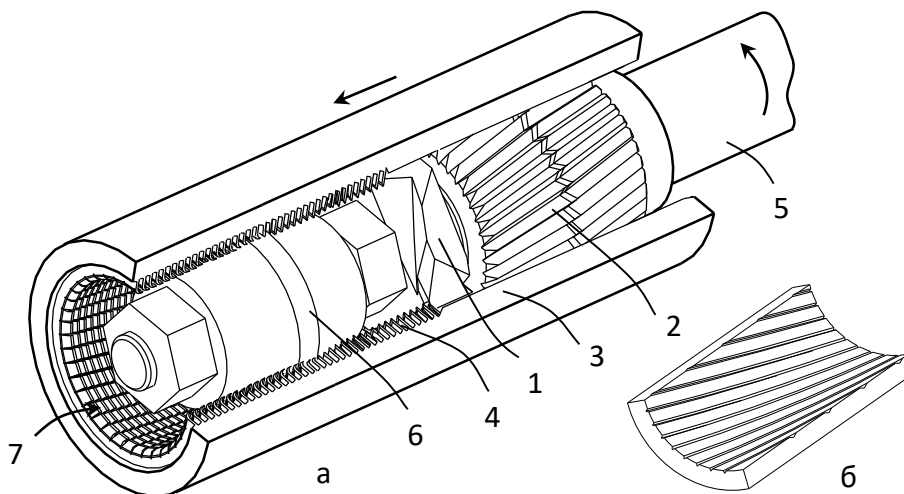
- 1 – трубная заготовка; 2 – трос; 3 – привод барабана; 4 – намоточный барабан;  
 5 – ролик; 6 – пневмоцилиндр цангового патрона; 7 – цанговые зажимы;  
 8 – поддерживающая стойка

Рисунок 11 – Принципиальная схема устройства для получения продольных или спиральных внутренних ребер режуще-деформирующей протяжкой

Трубная заготовка 1 закрепляется в цанговом зажиме 7, установленном в шпинделе станка. Цанговый зажим приводится в действие пневмоцилиндром 6. Для более надежной фиксации может использоваться второй пневматический цанговый зажим, расположенный на противоположном от шпинделя конце направляющих станка. При обработке длинномерных

труб (больше 4 метров), необходимо использовать стойку 8, которая предотвратит изгиб трубной заготовки под действием собственного веса. С левой стороны передней бабки крепится привод 3, состоящий из электромотора, редуктора и намоточного барабана 4.

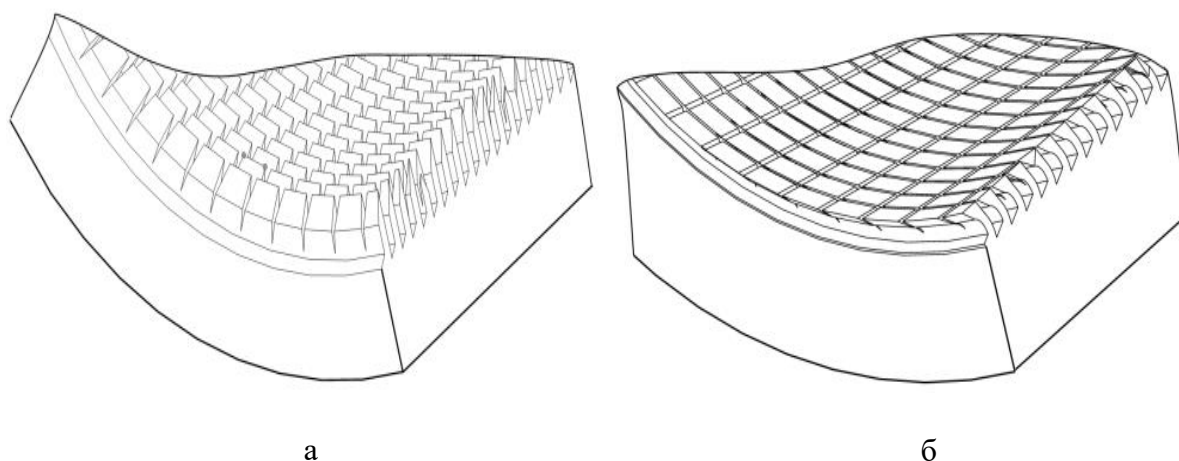
Метод ДР по пункту 2.3, сочетающий формирование продольных рисок и последующее деформирующее резание запатентован в США [19] и других странах. Риски, являясь концентраторами напряжений приводят к разрывам по длине образующегося при ДР ребра, формируя штырьковую структуру. Техническая сущность способа и инструментарий для его реализации поясняется на рис. 12.



а) модель процесса; б) поверхность трубной заготовки после деформирующей протяжки

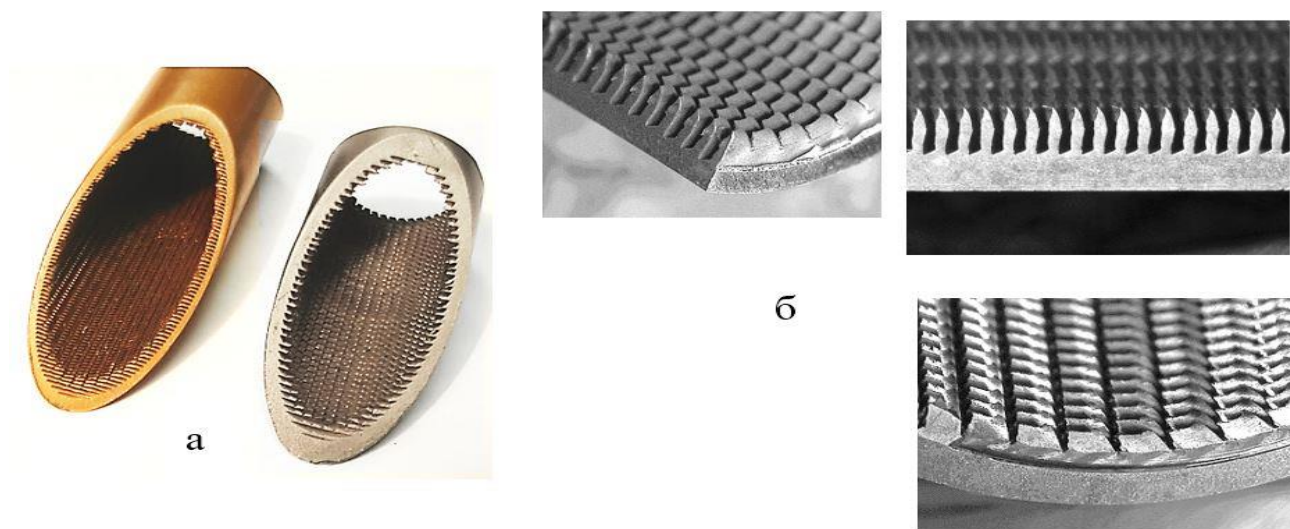
Рисунок 12 – Инструмент для формообразования развитой внутренней поверхности по методу ДР (пункт 2.3) [19]

На конце вращающейся внутри трубы 3 штанги 5 закреплен инструмент для ДР 1. На рис. 12 он показан одновершинным, хотя может быть многовершинным для повышения производительности. Перед инструментом установлена бочкообразная деформирующая протяжка 2 с наружными заостренными продольными или спиральными выступами треугольного профиля. Деформирующая протяжка имеет возможность свободного вращения на штанге 5. Диаметр по вершинам зубьев протяжки на десятые доли миллиметра больше внутреннего диаметра трубной заготовки. Результатом действия деформирующего инструмента является формирование неглубоких впадин на внутренней стороне трубной заготовки (рис.12, б). Треугольные выступы на деформирующем инструменте могут быть не параллельны оси трубы, что позволяет формировать наклонные канавки. Инструмент для ДР 1 подрезает поверхностный слой металла внутри трубы. Насечки, полученные деформирующим инструментом 2, являются концентраторами напряжения при образовании ребра методом ДР и обеспечивают его разрыв по длине, образуя штырьковую структуру 7 внутри трубы (рис. 13, а). Поверхность штырьковых структур эффективна для конденсации паров, поскольку острые вершины штырьков растягивают пленку конденсата, повышая коэффициент теплоотдачи [20]. Фотографии полученных по методу ДР (пункт 2.3) профилей поверхностей показаны на рис. 14.



а – штырьковые поверхности для конденсации, получаемые без использования выглаживателя;  
б – поверхности пузырькового кипения, получаемые с использованием выглаживателя

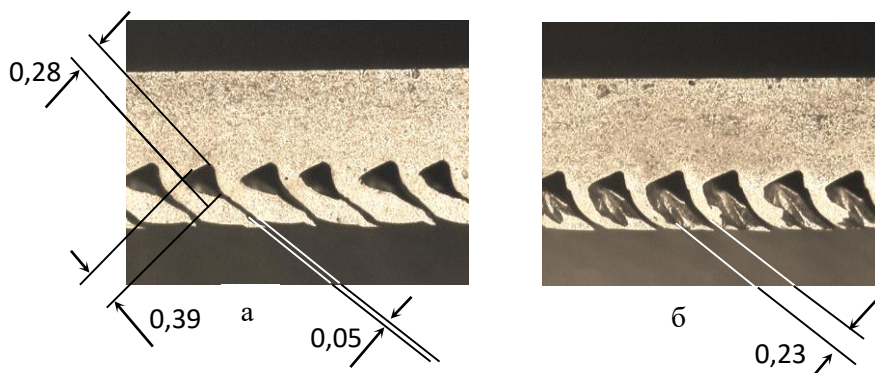
Рисунок 13 – Модели структур теплообменных, полученных по методу ДР (пункт 2.3)



Шаг ребер – 0,5 мм; высота рельефа – 1,2 мм;  
а) медь М1 и мельхиор МНЖМц 30-1-1; б) срезы структур

Рисунок 14 – Теплообменная штырьковая поверхность, полученная по методу ДР (пункт 2.3)

Выглаживатель 6 (рис. 12) используется при необходимости получения полузамкнутых подповерхностных полостей, интенсифицирующих пузырьковое кипение. Модель такой поверхности показана на рис. 13, б, а срез структуры с характерными размерами показан на рис. 15.

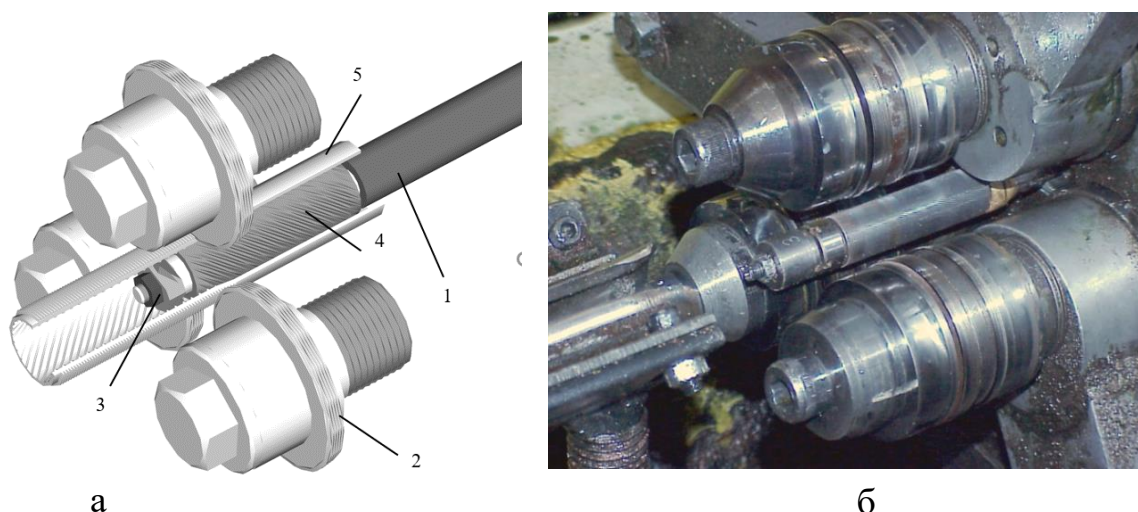


Материал – медь М1; шаг структуры – 0,53 мм, высота структуры – 0,58 мм;  
 продольное сечение структуры: а) по подповерхностным полостям;  
 б) в месте выхода пара

Рисунок 15 – Подповерхностные полости для интенсификации пузырькового кипения, полученные по методу ДР (пункт 2.3) с выглаживателем

По методу ДР (пункт 2.4) разработан способ, изображенный на рис. 16 [21]. На неподвижной штанге 1, расположенной внутри трубы 5 размещена свободно вращающаяся оправка 4 с винтовыми канавками. Воздействием снаружи трех вращающихся роликов 2 производится редуцирование диаметра трубы 5, при этом на внутренней поверхности трубы образуются выступы, соответствующие форме канавок оправки 4. Вращающиеся ролики 2 приводят также к вращению трубной заготовки 5. Инструмент для ДР 3, расположен на конце штанги 1. При вращении трубной заготовки 5 инструмент для ДР формирует из материала выступов штырьковую структуру.

Апробировано получение внутренних штырьковых поверхностей с различным количеством предварительно полученных выступов и шагом ДР.



а) модель процесса; б) фотография устройства реализации

Рисунок 16 – Реализация формирования штырьковых внутренних поверхностей по методу ДР (пункт 2.4)



Поверхность, полученная предлагаемым методом обработки, показана на рис. 17.

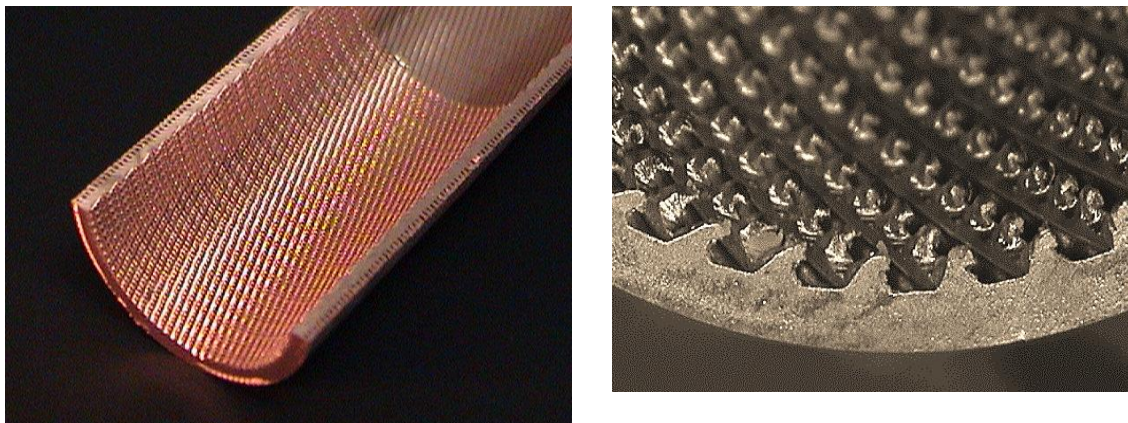
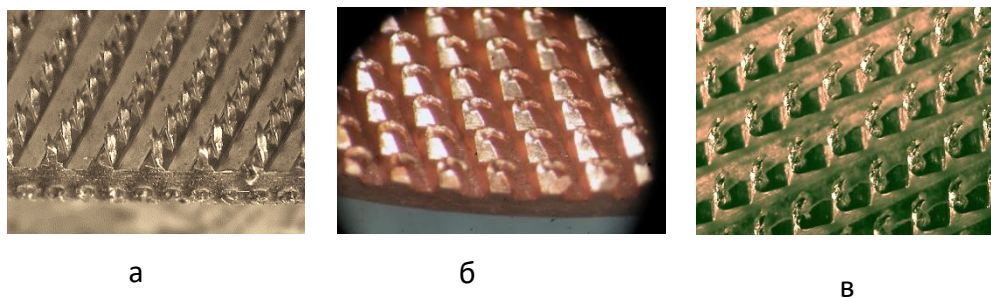


Рисунок 17 – Микроструктурированная штырьковая внутритрубная теплообменная поверхность, полученная методом ДР (пункт 2.4)

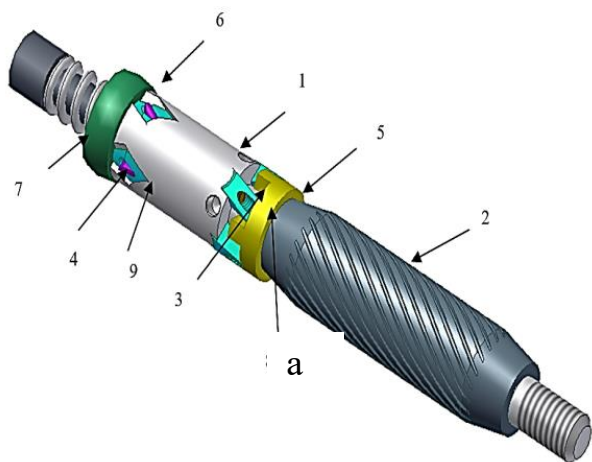
Форма штырьков управляема. Возможно получение прямых (игольчатых), крючкообразных штырьков и штырьков винтового типа (рис. 18). Принципы управления формой штырьков, получаемых ДР, изложены в работе [22].



а) прямые (игольчатые); б) крючкообразные; в) винтовые

Рисунок 18 – Формы штырьков, получаемых методом ДР (пункт 2.4)

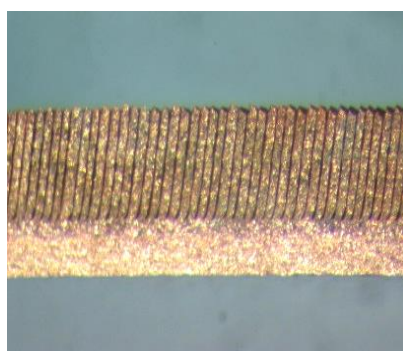
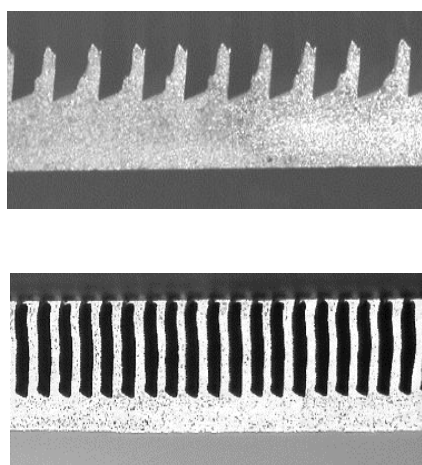
Инструмент, представленный на рис. 16, не позволяет оставлять гладкими начальный и конечный внутренний участок трубы, что необходимо в случае крепления труб в трубных досках развальцовкой. Разработан и запатентован инструмент для формирования штырьковой внутритрубной поверхности методом ДР по пункту 2.4 с возможностью выдвижения инструментов на глубину резания [23]. Основной особенностью разработанного инструмента (рис. 19) является автоматическое выдвижение режуще-деформирующих резовых вставок на требуемую глубину резания. Это осуществляется при сжатии трубы наружными вальцующими роликами, редуцирующими трубную заготовку. Сжатие наружных роликов приводит к торможению осевого перемещения оправки 2, что создает осевую силу, воздействующую на толкатель 5 державок 3 инструментов 9. Осевое перемещение державок 3 в силу их наклонного расположения по отношению к оси корпуса 1 приводит к увеличению диаметральных размеров инструмента для ДР 9, который осуществляет работу по формированию микроштырьков из ранее полученных спиральных выступов.



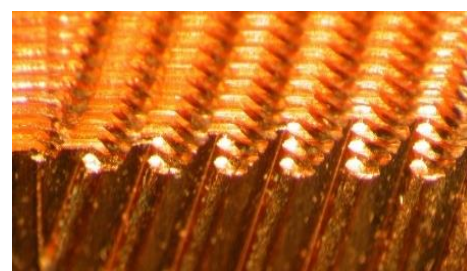
а) модель инструмента; б) инструмент в разобранном виде

Рисунок 19 – Инструмент с выдвижными резцами для формирования штырьковых внутренних поверхностей методом ДР по пункту 2.4

Получение микроструктурированной внутритрубной поверхности методом ДР по пункту 2.5 основано на формировании микрорельефа данным методом в виде ребер или штырьков на ленте с последующей вальцовкой ленты в трубу и герметизацией стыка сваркой или пайкой. Варианты оребренных и микроштырьковых структур на ленте показаны на рис. 20. Фотография готовой трубы после пайки приведена на рис. 21. Помимо интенсификации внутритрубного теплообмена, продольные внутренние микроканалы на стенке трубы могут быть использованы в качестве капиллярно-пористых структур тепловых труб (рис. 21). Апробировано получение межреберных зазоров от 3 мкм, способных поднимать жидкость на высоту до 500 мм при минимальном гидравлическом сопротивлении [24].



а



б

а) микрооробренные; б) микроштырьковые

Рисунок 20 – Структуры на ленте, полученные ДР (пункт 2.5)

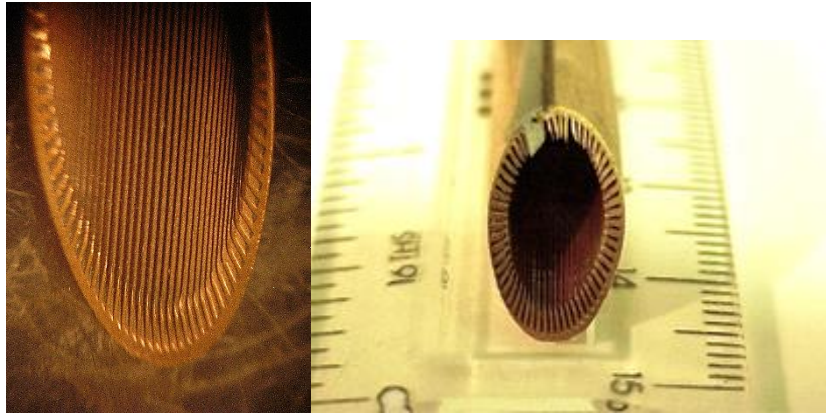
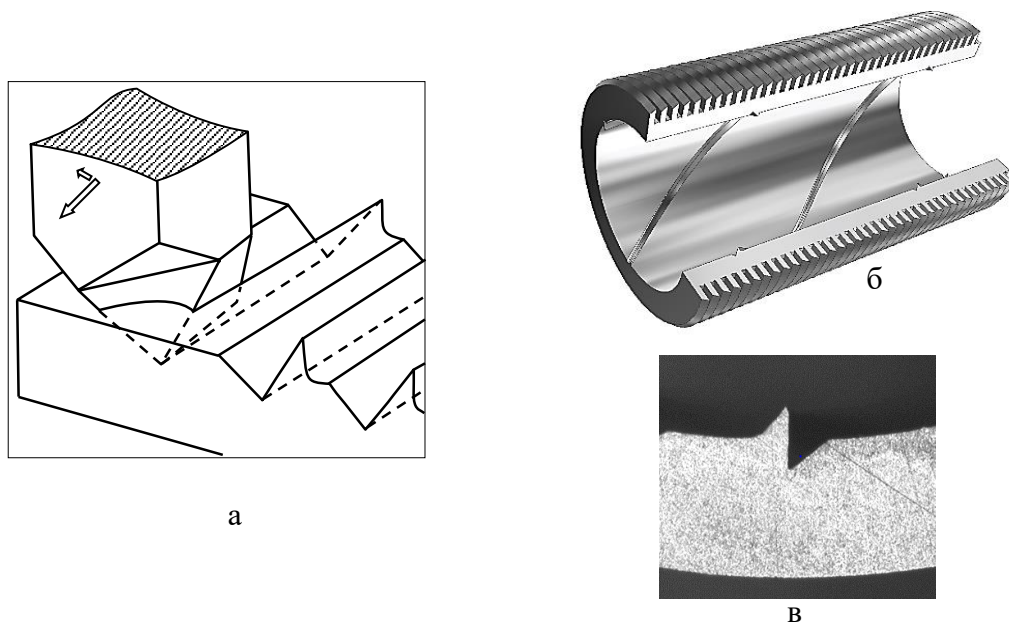


Рисунок 21 – Тепловая труба с внутренним продольным оребрением, полученная из оребренной ленты

Винтовые выступы-нарезы, полученные методом ДР по пункту 2.6, на внутренней поверхности трубы практически не увеличивают площадь теплообменной поверхности, но закручивая поток, значительно увеличивают коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к теплоносителю за счет разрушения пристеночного слоя. Иллюстрация принципа получения выступов-нарезов, выступы-нарезы на внутренней стороне наружно-оребренной трубы и форма сечения выступа-нареза приведены на рис. 22.



а – схема формирования выступов-нарезов; б – выступы-нарезы на внутренней поверхности наружно-оребренной трубы; в – поперечное сечение выступа-нареза

Рисунок 22 – Получение выступов-нарезов



Форма и размеры выступов-нарезов управляются выбором геометрических параметров инструмента для ДР и глубиной деформирующего резания (рис. 23). Более подробно об особенностях ДР при работе инструмента с выдавкой подрезанного слоя на обрабатываемую поверхность изложено в работе [25].

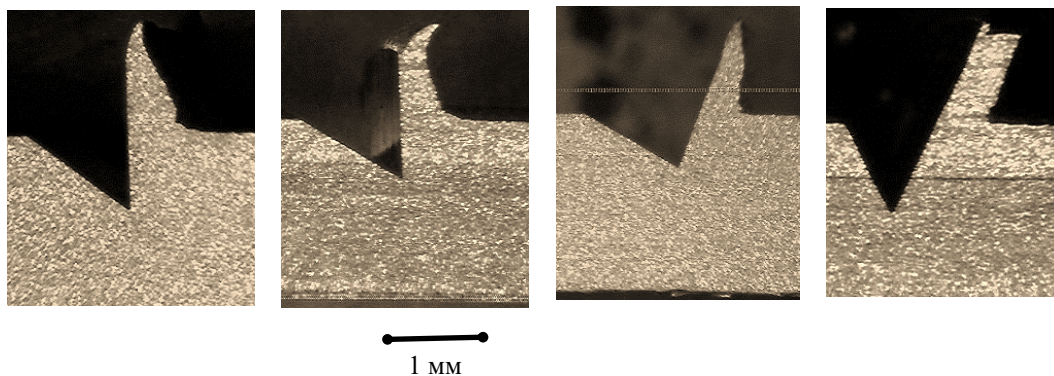


Рисунок 23 – Варианты форм выступов-нарезов на внутренней стенке теплообменной трубы

Получение одного или нескольких винтовых выступов-нарезов на внутренней стороне трубы методом ДР по пункту 2.6 предполагает необходимость движения инструмента относительно заготовки по винтовой линии, что осуществляется сочетанием относительного линейного и вращательного движений.

Требуемый угол подъема винтовой линии ребер-нарезов может обеспечиваться двумя вариантами:

- согласованное принудительное вращательно-поступательное движение заготовки относительно инструмента, либо инструмента относительно заготовки. Данный вариант обеспечивает строго заданный угол подъема винтовой линии при возможности его регулирования во всем возможном диапазоне, т.е. от нуля до практически  $90^\circ$ .

- использование несимметричности силовых нагрузок на режущо-деформирующий клин, которые при относительном поступательном движении будут обеспечивать самовращение осесимметричного инструмента с получением траектории относительного движения на внутренней стороне трубы в виде винтовой линии. Данный подход представляет несомненный интерес с технологической точки зрения, поскольку существенно упрощает техническую реализацию получения выступов-нарезов за счет отказа от привода вращательного движения, оставив только привод относительного поступательного движения. Однозначны также и недостатки данной схемы реализации: угол подъема винтовой линии будет зависеть от технологических параметров процесса деформирующего резания, которые определяют силовое взаимодействие инструмента и заготовки.

Согласованное принудительное вращательно-поступательное движение заготовки относительно инструмента можно осуществить любым из следующих вариантов:

- заготовка неподвижна, инструмент на штанге вращается и имеет движение подачи вдоль трубной заготовки. Привод вращения инструмента устанавливается на тянущее устройство. Схема рекомендуется для обработки длинномерных заготовок.

- инструмент неподвижен, трубная заготовка вращается и движется вдоль оси. Схема перспективна, особенно, для обработки длинномерных заготовок. Одновременное вращение и линейное перемещение трубной заготовки можно осуществить приводом из трех скрещиваю-



щихся роликов. Угол скрещивания роликов определяет соотношение вращательного и поступательного движения, т.е. угол подъема винтовой линии выступов-нарезов. Существенным недостатком схемы является сложность кинематики привода скрещивающихся ведущих валов.

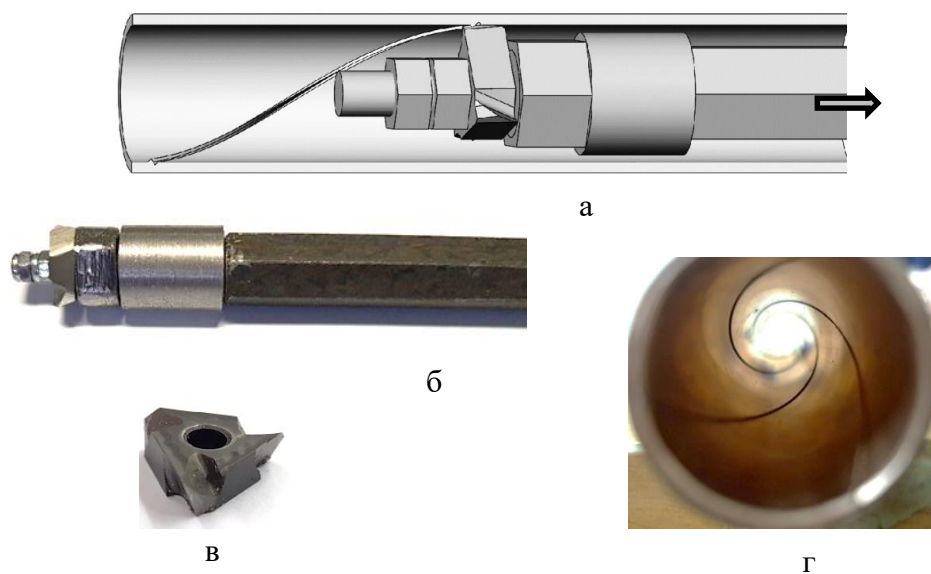
– вращается только инструмент, заготовка имеет линейное перемещение. Данная схема также перспективна для обработки длинномерных заготовок. Необходим привод линейного перемещения трубной заготовки, аналогичный показанному на рис. 11 и неподвижный привод вращения штанги с инструментом.

– вращается только заготовка, инструмент линейно перемещается. Схема наиболее технологична для обработки коротких труб непосредственно на токарном станке. Труба зажимается в кулачках патрона, штанга с инструментом закрепляется в задней бабке, которая отодвигается продольным суппортом на автоматической подаче, вытягивая инструмент из трубы.

Каждая из рассмотренных схем имеет свои преимущества и недостатки и имеет право на реализацию в зависимости от серийности производства, длины труб, необходимости одновременной обработки наружной поверхности и других факторов.

Помимо использования схемы с принудительным вращательным движением инструмента и/или заготовки апробирован вариант получения выступов-нарезов за счет самовращения инструмента для ДР. Данный вариант не требует принудительного вращения инструмента или трубной заготовки. Инструмент имеет скользящую посадку на оправке и за счет несимметричности нагрузок на передней и задней поверхностях инструмента автоматически поворачивается при его движении вдоль трубы, создавая винтовой нарез-выступ. Управление несимметричностью нагрузки (углом подъема винтовой линии) осуществляется изменением положения передней и/или задней поверхности. На практике наиболее простым способом оказалось управление за счет изменения заднего угла. Данная схема имеет существенные преимущества по простоте реализации, однако, угол подъема винтовой линии ограничен величиной  $20^\circ$  к оси трубы.

На рис. 24 показан инструментарий для реализации получения выступов-нарезов самовращающимся трехзубым инструментом.



глубина нарезов равна высоте выступов – 0,5 мм;  
 а) модель процесса; б) оправка с инструментом; в) режуще-деформирующая пластина; г) результат обработки на медной трубе

Рисунок 24 – Реализация получения трехвинтовых выступов-нарезов самовращающимся инструментом

Схема реализована на коротких трубах с закреплением трубной заготовки в патроне и закреплением штанги с инструментом в резцедержателе. Движение инструмента осуществлялось ускоренной подачей продольного суппорта без вращения шпинделя. Исследованиями [26] доказана тепловая эффективность получаемых выступов-нарезов при интенсификации внутритрубного теплообмена при незначительном увеличении их гидравлического сопротивления [27].

#### 4 Обсуждение и заключение

Анализ существующих схем увеличения площади внутренней поверхности теплообменных труб или создания внутри труб интенсификаторов теплообменных процессов показывает обоснованную целесообразность и перспективность использования метода деформирующего резания для создания внутритрубных развитых поверхностных структур. Метод ДР сочетает лезвийную обработку для получения на обрабатываемой поверхности подрезанных слоев металла без их отделения от основы и их одновременное пластическое деформирование. Возможности метода ДР заключаются в получении множества вариантов, в том числе представленных в работе, формирования на внутренней поверхности теплообменных труб макроструктуры в виде оребрения, микроштырьков и выступов-нарезов треугольного профиля с управляемыми геометрическими параметрами. Это обеспечивает возможность увеличения площади внутренней поверхности труб на величину до 5,9 раз. Предложено использование метода ДР для внутритрубной интенсификации конвективного, испарительного и конденсационного теплообмена, что актуально для теплообменных аппаратов на основе труб. Качественно проанализированы важные вопросы технологичности методов ДР, при этом представляет большой интерес количественная оценка трудоемкости и др. показателей данных методов, что может быть раскрыто в дальнейших исследованиях.

#### Список литературы

- 1 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 2 Pat. US 5,975,196. Heat transfer tube / D. Gaffaney, S. Spencer, D. Bennett et al. 1999.
- 3 Pat. US 6,176,301. Heat transfer tube with crack-like cavities to enhance performance thereof / D. Bennett, L. Tang. 2001.
- 4 Pat. US 6,883,597. Heat transfer tube with grooved inner surface / P. Thors, R. Narayanamurthy. 2005.
- 5 Pat. US 4733698. Heat transfer tube / Y. Sato. 1988.
- 6 Pat. US 5781996. Method of manufacturing heat transfer tube / Steven J. Spencer. 1998.
- 7 EP 2216615. Heat transfer tube and method for its production / A. Beutler, J. Hajal, 2014.
- 8 Compact and Efficient Solutions with Enhanced Heat transfer Surfaces. J. Moreno, Wieland Thermal Solutions. Presentations from the I-ThERM workshop in Industrial Thermal Energy Recovery, Conversion and Management, 24 October 2017, Brunel University, UK. [http://www.itherm-project.eu/wp-content/uploads/2017/11/08\\_JesusMoreno\\_Brunel-London-2017.pdf](http://www.itherm-project.eu/wp-content/uploads/2017/11/08_JesusMoreno_Brunel-London-2017.pdf).
- 9 Афанасьева, И. В. Перспективные методы оребрения теплообменных аппаратов // Современные наукоемкие технологии. 2019. – з № 7. – с.114-121.
- 10 Вайцехович, С. М. Спирально-профильные трубы: преимущества и перспективы применения в теплообменных аппаратах // Технология машиностроения. 2011. – № 12. – С. 31–37.
- 11 Rohit S.N., Balaji C. Synergistic analysis of heat transfer characteristics of an internally finned two phase closed thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*. 2016. vol. 101. P. 720–729. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.084.

- 12 Swastik A., Sukanta K.D. Natural convection heat transfer from a horizontal hollow cylinder with internal longitudinal fins. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. vol. 134. P. 40–53. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.039.
- 13 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 14 Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // *Новости теплоснабжения*. – 2005. – № 4. – С. 51-53.
- 15 Zubkov N. Multitool deformation and cutting in applying fins to heat-exchanger pipe. // *Russian Engineering Research*. 2015. – V. 35, Issue 11, – pp 859-863.
- 16 Kim N., Choi K. Nucleate pool boiling on structured enhanced tubes having pores with connecting gaps // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2001. – No.44. – С. 17–28.
- 17 Володин, О. А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // *Теплофизика высоких температур*, 2021. - Т. 59. – № 2. - с.280-312. DOI: 10.31857/S0040364421020149.
- 18 Зубков, Н.Н. Получение подповерхностных полостей деформирующим резанием для интенсификации пузырькового кипения // *Вестник машиностроения*. – 2014. – № 11. –С. 75-79.
- 19 Pat.US 8573022. Method for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov. 2013.
- 20 Попов И. А., Махьянов Х. М., Гуреев В. М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена // *Казань: Центр инновационных технологий*. – 2009. – 560 с.
- 21 Pat US 7637012. Method of forming protrusions on the inner surface of a tube / P.Thors, N. Zoubkov. 2009.
- 22 Получение штырьковых структур для кипения азота. / Зубков Н.Н., Трофимович А.С., Овчинников А.И. и др. // *Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: машиностроение*. – 2013. – Т.1, № 1. – С. 100-109.
- 23 Pat. US 7509828. Tool for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov; 2009.
- 24 Zubkov N, Yakomaskin A. Microgrooved Wicks for Heat Pipes Made by Edge Cutting Machining // *Second International Conference “Heat Pipes for Space Application” [Электронный ресурс]: материалы конф. – Электрон. дан. — Москва: 2014. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM), – Загл. с этикетки диска. – ISBN 978-5-9901909-2-4 – 6 стр.*
- 25 Зубков Н.Н. Однопроходное формирование резьб на пластичных металлах деформирующим резанием // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17.
- 26 Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning / Skrypnik A.N., Shchelchikov A.V., Popov I. A. et al. // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2018. – Vol.91, No. 1. – pp. 52-63. DOI 10.1007/s10891-018-1718-y.
- 27 Hydraulic resistance of tubes with internal helical finning designed by deforming cutting. I.A. Popov, A.V. Shchelchikov, A.N.Skrypnik, et al. // *Journal of physics: conference series*. – 2018. – V. 980. – 012004. doi:10.1088/1742-6596/980/1/012004.

## References

- 1 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 2 Pat. US 5,975,196. Heat transfer tube / D. Gaffaney, S. Spencer, D.Bennett et al. 1999.
- 3 Pat. US 6,176,301. Heat transfer tube with crack-like cavities to enhance performance thereof / D. Bennett, L. Tang.2001.

- 4 Pat. US 6,883,597. Heat transfer tube with grooved inner surface / P. Thors, R. Narayana-murthy. 2005.
- 5 Pat. US 4733698. Heat transfer tube / Y. Sato. 1988.
- 6 Pat. US 5781996. Method of manufacturing heat transfer tube / Steven J. Spencer. 1998.
- 7 EP 2216615. Heat transfer tube and method for its production / A. Beutler, J. Hajal, 2014.
- 8 Compact and Efficient Solutions with Enhanced Heat transfer Surfaces. J. Moreno, Wieland Thermal Solutions. Presentations from the I-ThERM workshop in Industrial Thermal Energy Recovery, Conversion and Management, 24 October 2017, Brunel University, UK. [http://www.itherm-project.eu/wp-content/uploads/2017/11/08\\_Jesus\\_Moreno\\_Brunel-London-2017.pdf](http://www.itherm-project.eu/wp-content/uploads/2017/11/08_Jesus_Moreno_Brunel-London-2017.pdf).
- 9 Afanas'yeva I.V. Perspektivnyye metody orebreniya teploobmennykh apparatov (Promising methods of finning heat exchangers). *Sovremennyye naukoymekkiye tekhnologii*. 2019. № 7. с.114-121. (In Russian).
- 10 Vaytsekhovich S. M. Spirallyno-profil'nyye trubyy: preimushchestva i perspektivy primeneniya v teploobmennykh apparatakh (Spiral profile pipes: advantages and prospects of application in heat exchangers) // *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2011, № 12. S. 31–37. (In Russian).
- 11 Rohit S.N., Balaji C. Synergistic analysis of heat transfer characteristics of an internally finned two phase closed thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*. 2016. vol. 101. P. 720–729. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.084.
- 12 Swastik A., Sukanta K.D. Natural convection heat transfer from a horizontal hollow cylinder with internal longitudinal fins. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. vol. 134. P. 40–53. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.039.
- 13 Luanfang D., Xiang L., Hao P. Flow and heat transfer characteristics of a double-tube structure internal finned tube with blossom shape internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 2018. vol. 128. P. 1102–1115. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.026.
- 14 Zubkov N.N. Orebreniye trub teploobmennykh apparatov podrezaniyem i otgibkoy poverkhnostnykh sloeyev (Finning of heat exchanger tubes by undercutting and bending of surface layers) // *Novosti teplosnabzheniya*. – 2005. – № 4. – S. 51-53. (In Russian).
- 15 Zubkov N. Multitool deformation and cutting in applying fins to heat-exchanger pipe. // *Russian Engineering Research*. 2015. – V. 35, Issue 11, – pp 859-863. (In Russian).
- 16 Kim N., Choi K. Nucleate pool boiling on structured enhanced tubes having pores with connecting gaps // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2001. – No.44. – C. 17–28.
- 17 Volodin O A, Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. Intensifikatsiya teploobmena pri kipenii i isparenii zhidkostey na modifitsirovannykh poverkhnostyakh (Intensification of heat exchange during boiling and evaporation of liquids on modified surfaces) // *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2021, T. 59, № 2, s.280-312. DOI: 10.31857/S0040364421020149. (In Russian).
- 18 Zubkov N.N. Polucheniye podpoverkhnostnykh polostey deformiruyushchim rezaniyem dlya intensivatsii puzyr'kovogo kipeniya (Obtaining subsurface cavities by deformational cutting to intensify bubble boiling) // *Vestnik mashinostroyeniya*. – 2014. – № 11. –S. 75-79. (In Russian).
- 19 Pat.US 8573022. Method for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov. 2013.
- 20 Popov I. A., Makhyanov KH. M., Gureyev V. M. Fizicheskiye osnovy i promyshlennoye primeneniye intensivatsii teploobmena (Physical basis and industrial application of heat exchange intensification) // *Kazan': Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy*. – 2009. – 560 s. (In Russian).
- 21 Pat US 7637012. Method of forming protrusions on the inner surface of a tube / P.Thors, N. Zoubkov. 2009.
- 22 Polucheniye shtyr'kovykh struktur dlya kipeniya azota (Obtaining pin-fin structures for nitrogen boiling) / Zubkov N.N., Trofimovich A.S., Ovchinnikov A.I. i dr. // *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: mashinostroyeniye*. – 2013. – T.1, № 1. – C. 100-109. (In Russian).
- 23 Pat. US 7509828. Tool for making enhanced heat transfer surfaces / P.Thors, N. Zoubkov; 2009.



24 Zubkov N, Yakomaskin A. Microgrooved Wicks for Heat Pipes Made by Edge Cutting Machining // Second International Conference “Heat Pipes for Space Application” [Elektronnyy resurs]: materialy konf. – Elektron. dan. — Moskva: 2014. — 1 elektron. opt. disk (CD-ROM), – Zagl. s etiketki diska. – ISBN 978-5-9901909-2-4 – 6 p.

25 Zubkov N.N. Single pass formation of threads on ductile metals by deformational cutting. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17. (In Russian).

26 Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning / Skrypnik A.N., Shchelchkov A.V., Popov I. A. et al. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – Vol.91, No. 1. – pp. 52-63. DOI 10.1007/s10891-018-1718-y.

27 Hydraulic resistance of tubes with internal helical finning designed by deformational cutting. I.A. Popov, A.V. Shchelchkov, A.N.Skrypnik, et al. // Journal of physics: conference series. – 2018. – V. 980. – 012004. doi:10.1088/1742-6596/980/1/012004.

© Зубков Н.Н., 2023