

УДК 621.01

**А. Н. Михайлов**, д-р техн. наук, проф., **С. Б. Котляров**, аспирант, **В. Б. Котляров**, аспирант, **Б. С. Котляров**, канд. техн. наук.

Донецкий национальный технический университет, ДНР, Россия

Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org); [boris.kotlyarov@mail.ru](mailto:boris.kotlyarov@mail.ru); [velidarkotlarov@mail.ru](mailto:velidarkotlarov@mail.ru)

## К ВОПРОСУ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛОВЗОВ

*В настоящей работе описаны результаты проведенных исследований вопросов формирования геометрии и поверхностных свойств деталей тепловзвов, заданных согласно требованиям КД (конструкторской документации), достигаемые с применением функционально-ориентированных технологий (ФОТ) путем применения методов холодной объемно-поверхностной деформации. Приведены данные, позволяющие оценить перспективность предложенного способа проведения работ по восстановлению работоспособности и увеличению ресурса межремонтной эксплуатации маслоохладителей маневровых тепловзвов путем применения технологии холодной объемно-поверхностной деформации материала при оребрении медных труб с целью увеличения теплообменной поверхности. Установлен алгоритм поиска оптимальных схем формирования эксплуатационных свойств функционально значимых поверхностей, относящихся к частям, участкам, зонам, микрозонам и нанозонам деталей, на основе итеративного рекуррентного выбора оптимального способа функционально-ориентированного технологического воздействия из определенного множества ФОТ.*

**Ключевые слова:** медная труба, оребрение, часть, участок, зона, ФОТ-воздействие, формирование профиля, пластичность, износостойкость, ХОППД (холодная объемно-поверхностная пластическая деформация).

**A. N. Mihailov, S. B. Kotliarov, V. B. Kotliarov, B. S. Kotlyarov.**

## ON THE QUESTION OF EXPANDING THE APPLICATION SCOPE OF FOT IN THE REPAIR PRODUCTION OF SPECIFIC PARTS OF DIESEL LOCOMOTIVES

*This paper describes the results of the studies conducted on the formation of geometry and surface properties of diesel locomotive parts, specified according to the requirements of the CD design documentation, achieved with the use of functionally oriented technological technologies (FOT) by applying methods of cold volumetric-surface deformation. The data are presented to assess the prospects of the proposed method of carrying out work to restore operability and increase the service life of oil coolers of shunting locomotives by applying the technology of cold volumetric-surface deformation of the material when finning copper pipes in order to increase the heat exchange surface. An algorithm is established for searching for optimal schemes for the formation of operational properties of functionally significant surfaces related to parts, sections, zones, microzones and nanozones of parts, based on iterative recurrent selection of the optimal method of functionally oriented technological impact from a certain set of photos.*

**Keywords:** copper pipe, finning, part, section, zone, PHOTO-impact, profile formation, plasticity, wear resistance, CVSPD (cold volume-surface plastic deformation).

### 1. Введение

Рассмотренные ранее [1, 2] аспекты применения функционально-ориентированных технологий (ФОТ) при изготовлении продукции машиностроения, в частности, при обработке деталей машиностроительного профиля, начиная от формирования заготовки до осуществления финишных операций, следует дополнить более подробным описанием возможностей выполнения малоотходных и безотходных технологических процессов. В качестве примера для рассмотрения приводится применение безотходной технологии формирования геометрии и поверхностных свойств деталей – трубы маслоохладителей маневровых тепловзвов. Эскиз такой трубы приведен на рис. 1.

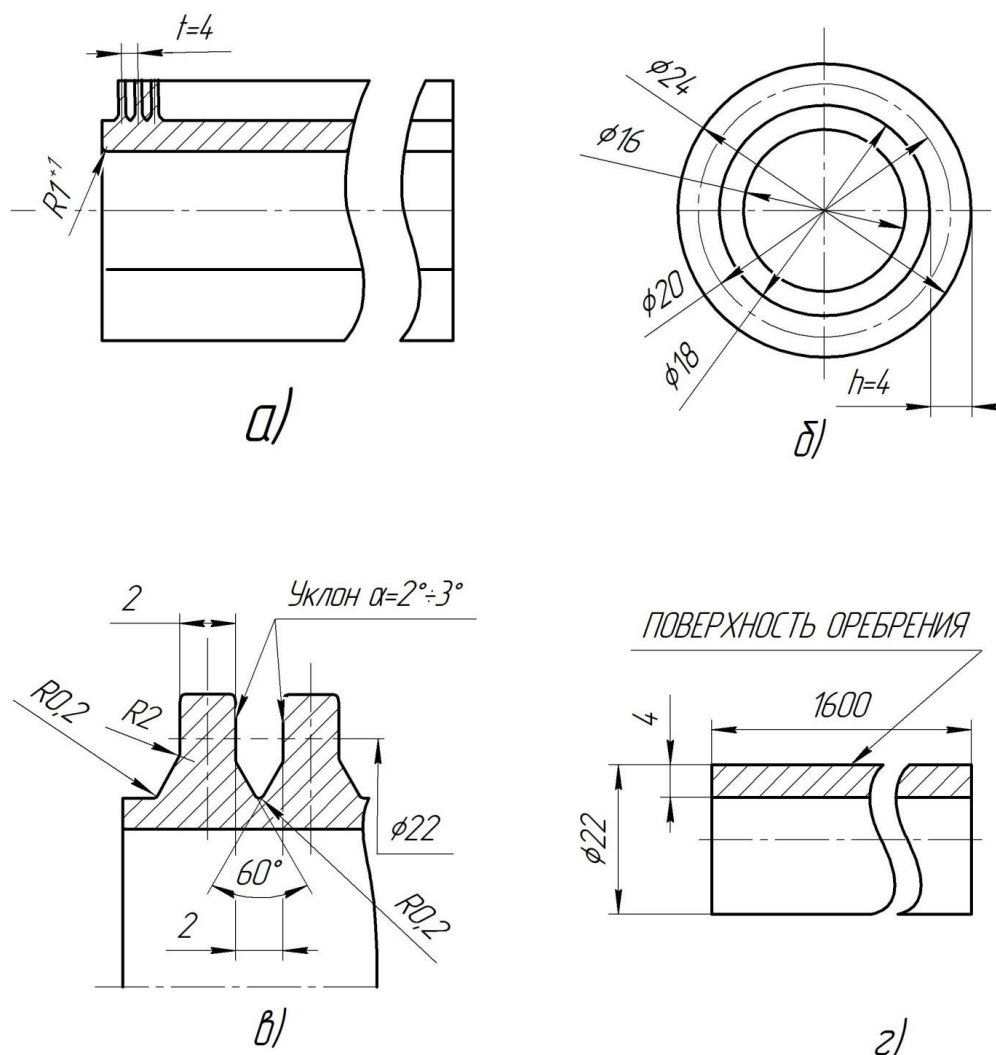


Рисунок 1. Эскиз оребренной медной трубы маслоохладителя тепловоза  
 а) общий вид трубы с винтообразным оребрением; б) торцевые размеры оребрения;  
 в) профиль ребер оребренной трубы; г) изначальная труба для оребрения.

## 2. Цель и задачи

Целью данной статьи является подтверждение актуальности процесса ФОТ-воздействия для безотходной обработки оребренной трубы для маслоохладителей гидропередач двигательных установок маневровых тепловозов серии ТЭМ и ТГМ. При этом следует рассмотреть в первом приближении различные методы формирования требуемого профиля и определить критерии выбора лучшего варианта обработки.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Обосновать актуальность изготовления оребренных труб для маслоохладителей гидропередач маневровых тепловозов.
2. Провести укрупненный анализ возможных способов формообразования для создания геометрического профиля труб маслоохладителей.
3. Выделить существенные конструктивно значимые признаки оребренных труб, являющиеся функционально значимыми при эксплуатации.

4. Установить укрупненную взаимосвязь между конструктивно значимыми функциональными признаками труб и технологическими признаками ФОТ-воздействий при помощи принятого инструментального обеспечения.

5. Установить зоны локализации элементов и конструктивных атрибутов трубы и элементов инструментального обеспечения – накатных роликов.

### 3. Основное содержание

Функциональное назначение такой трубы – передача излишнего тепла, нагретого в процессе работы масла, циркулирующего в системе гидropередачи и контактирующего с наружной поверхности трубы, охлаждающей жидкости – воде, циркулирующей по внутреннему объему трубопровода. Максимально эффективное выполнение возложенной функции маслоохладителя возможно при максимальном коэффициенте передачи тепла, зависящего от материала трубы и от площади поверхности, по которой осуществляется соприкосновение масла с наружной поверхностью трубы.

Очевидно, что требуется увеличивать контактную поверхность трубы с разогретым маслом. Это возможно за счет развития наружной поверхности трубы. Чаще всего это увеличение поверхности происходит за счет создания ребер на трубе. Таким образом, наиболее функционально значимым элементом трубы маслоохладителя является наружная поверхность с развитым оребрением. При этом принципиально ребра внешней поверхности могут выполняться как продольными, так и поперечными или винтовыми. На рис. 1 представлен эскиз медной трубы маслоохладителя с винтовым оребрением. Вид в плане рис. 1а и вид с торца рис. 1б отражают общие размеры оребренной трубы. На рис. 1в отображены параметры профиля ребер, а на рис. 1г приведены размеры трубы-заготовки.

Очевидно, что целесообразность выбора приемлемой технологии изготовления труб для теплообменников тепловозов включает в себя решение задач экономичности при выборе ФОТ, как было показано ранее [3, 4, 5], на различных этапах производства:

- выбор заготовки с учетом структуры материала;
- выбор структурной схемы и метода формообразования требуемой геометрии профиля;
- выбор ФОТ формирования поверхностных свойств теплообменных труб.

Материалы труб и их общая геометрии для теплообменных аппаратов хорошо изучены [6, 7 и др.], однако процессы их формирования и некоторые технологические аспекты изготовления имеют особенности, влияющие на общий характер теплообмена. Это происходит вследствие того, что в зависимости от применяемой ФОТ может меняться взаимное расположение элементов и их форма (профиль и геометрические параметры профиля труб), а также шероховатость поверхности. Этот факт в той или иной мере способствует или противоречит сохранению ламинарного потока омывающего трубу разогретого масла и может снижать коэффициент теплопередачи от рабочей среды к поверхности теплообменника в процессе эксплуатации [5, 6].

Так, например, оребренная труба может быть изготовлена литьем, горячей или холодной штамповкой с применением прессов. А можно ребра точить из цельной толстостенной трубы. В первом случае это очень эффективный процесс, который можно организовать при массовом производстве из-за высокого уровня первоначальных затрат на оборудование, логистику и т.д., что возможно при большой массе изготавливаемой продукции. Случай механической обработки из толстостенной трубы может быть применим при индивидуальном изготовлении единичных образцов.

Принципиально возможным способом реализации такой безотходной технологии является способ накатки ребер на поверхности трубы из материала самой заготовки трубы с расчетной толщиной стенки. При этом необходимо соблюдать принцип соответствия функционального назначения деталей, элементов, зон и микрзон элементов и частей детали технологическим особенностям функционально-ориентированных технологических воздействий (ФОТ-воздействий) достижения заданных конструкторской документацией параметров и требований, предъявляемых к готовой детали [5].

$$\Phi^{\Phi}_{\Sigma j} = \Phi^{\Phi}_{j1} \cap \Phi^{\Phi}_{j2} \cap \dots \cap \Phi^{\Phi}_{jt}, \quad (1)$$

При этом каждая из частных функций  $\Phi_j^{\phi}$  состоит из множества подфункций на каждом уровне по глубине технологического проявления:

$$\Phi^{\phi_j} = \Phi^{\phi_l}_{j(1-k)} \cap \Phi^{\phi_2}_{j(1-r)} \cap \Phi^{\phi_3}_{j(1-i)} \cap \Phi^{\phi_4}_{j(1-m)} \cap \Phi^{\phi_5}_{j(1-n)} \cap \Phi^{\phi_6}_{j(1-t)} \cap \Phi^{\phi_7}_{j(1-s)}, \quad (2)$$

где индексы верхние  $\Phi^{1-\Phi^7}$  при символе  $\Phi^{\Phi^{1-\Phi^7}}$  обозначают номер уровня по глубине проявления функции, а нижние индексы обозначают количество возможных частей, участков и зон на каждом рассматриваемом уровне формообразования  $j$ -ой детали из всего множества.

$$\begin{aligned} \Phi^{I1}_{j(1-k)} &= \Phi^{I1}_{j1} \cap \Phi^{I1}_{j2} \cap \Phi^{I1}_{j3} \cap \dots \cap \Phi^{I1}_{jk}, \\ \Phi^{I2}_{j(1-n)} &= \Phi^{I2}_{j1} \cap \Phi^{I2}_{j2} \cap \Phi^{I2}_{j3} \cap \dots \cap \Phi^{I2}_{jn}, \\ &\dots\dots\dots \\ \Phi^{I7}_{j(1-s)} &= \Phi^{I7}_{j1} \cap \Phi^{I7}_{j2} \cap \Phi^{I7}_{j3} \cap \dots \cap \Phi^{I7}_{js}, \end{aligned} \quad (3)$$

Объединение формул (2) и (3) дают в результате формулу (1), а мощность множества  $N^\Phi$  функционала (1) определяется мощностями подмножеств (2) и (3).

В частный функционал по структуре материала должны входить функции обеспечения минимального значения предела текучести, высокой степени вязкости, минимальной твердости, высокой теплопроводности и некоторые другие. Указанным требованиям соответствует материал трубы – медь.

Функционал по обеспечению требований к поверхностному слою включают те показатели, которые способствуют формированию низкой твердости и высокой чистоте поверхностного слоя трубы, чему также соответствует медь. Запись аналога функционала формирования поверхностных свойств аналогична выражению (1):

$$\Phi^{\Pi}_{\Sigma j} = \Phi^{\Pi}_{j1} \cap \Phi^{\Pi}_{j2} \cap \dots \cap \Phi^{\Pi}_{jt}, \quad (4)$$

где верхний индекс  $\Pi$  при символе  $\Phi$  означает принадлежность к функционалу поверхностных свойств формируемой поверхности.

Функционал геометрии, формы и размеров профиля трубы должен обеспечивать достаточную прочность элементов детали при минимальных усилиях изменения размеров элементов и перемещения объемов металла из одних в другие. Функционал свойств материала в заданной зоне участка записывается выражением аналогично (4), но верхний индекс  $M$  при символе  $\Phi$  означает принадлежность к способу формирования структуры и свойств материала детали:

$$\Phi^M_{\Sigma j} = \Phi^M_{j1} \cap \Phi^M_{j2} \cap \dots \cap \Phi^M_{jt}, \quad (5)$$

Дополнительно к проведенным ранее исследованиям по синтезу структурных схем формирования поверхностных свойств обрабатываемых деталей, в частности чистоты и шероховатости поверхностей согласно требованиям КД, на основе принятых к осуществлению функционально-ориентированных технологических воздействий, выполнен синтез структурных схем формирования поверхностных свойств, повышающих эксплуатационные характеристики оребренных труб маслоохладителей тепловозов.

Важным моментом для эксплуатации труб и формирования профиля ребер является форма и расположение ребер относительно поверхности основного тела трубы. Если принять более простое в изготовлении направление расположения ребра перпендикулярно оси трубы, то будет увеличена вероятность проявления турбулентности потока при обтекании горячего масла вокруг теплопередающей поверхности маслоохладителя. При этом изменяются условия теплопередачи при контакте масла с трубой и нарушаются расчетные параметры охлаждения масла в маслоохладителе, что приводит к нарушению режима эксплуатации агрегатов.

Ламинарное течение потока масла обеспечивается расположением ребер трубы по винтовой направляющей на поверхности трубы. На рис. 1 приведены реальные размеры оребренной медной трубы и размеры профиля ребер по высоте и боковым поверхностям, для которых в настоящей работе излагаются результаты проведенных исследований.

Общая схема оребрения медной трубы представлена на рис. 2.

Краткое описание элементов и особенностей приведенной на рис. 2 принципиальной схемы накатки винтового ребра на цельной медной трубе с применением 3-х роликов, размещенных на осях, установленных с угловым смещением на угол  $\beta$  относительно оси подлежащей оребрению трубы. Устройство позволяет применить его с токарно-винторезным станком 1К62, установив в штатном патроне, а подлежащая обработке труба пропускается через переднюю бабку. Осевая подача трубы осуществляется с помощью суппорта, на котором закрепляется толкатель. Величина осевой подачи трубы согласуется с подъемом винтовой линии, зависящей от шага винтовой линии ребер.

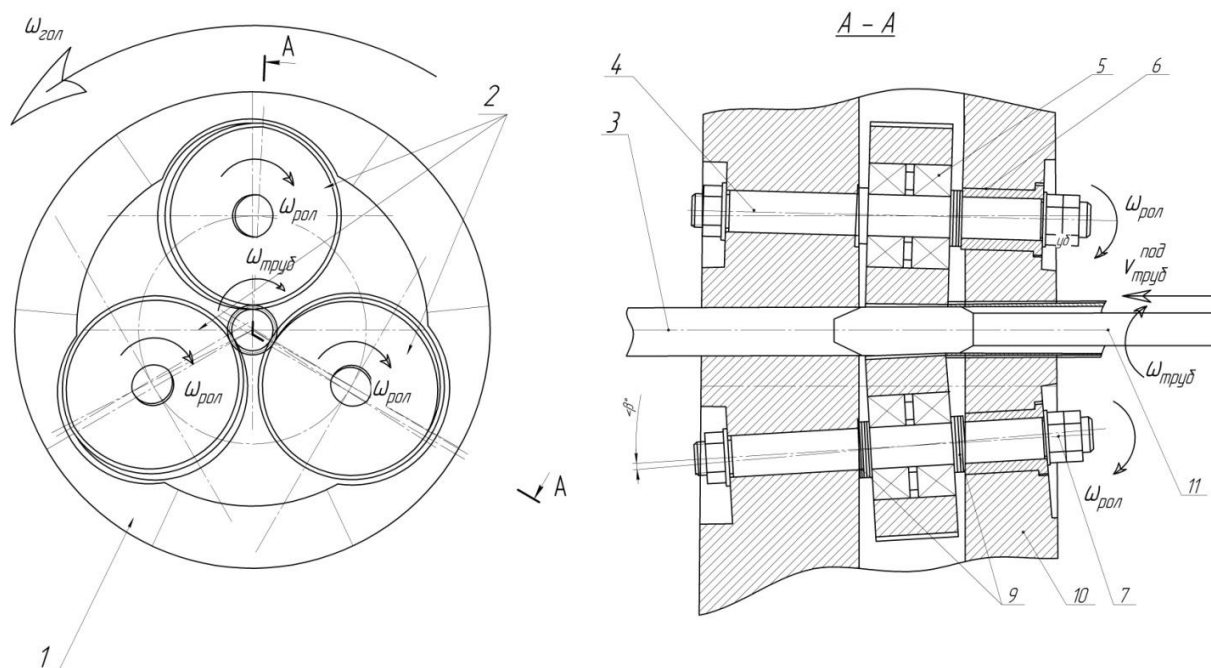


Рисунок 2. Схема оребрения труб роликовой головкой.

Общее конструктивное устройство включает в себя три цилиндрических ролика поз 2, снабженных профилем для формирования ребер, установленных в корпус поз 1 на осях поз. 4. Оси установлены с угловым смещением  $\beta$  в плоскости, параллельной оси трубы поз. 3, но смещенной на величину радиуса накатного ролика поз. 2 относительно точки контакта с трубой в точке формирования профиля ребра. Ролики на оси 4 устанавливаются на радиальных роликовых подшипниках поз. 5, а осевое положение по отношению к опорным поверхностям корпуса регулируется шайбами поз. 9. Другой конец оси 4 устанавливается через втулку поз 6 в крышку поз. 9 и фиксируется с помощью крепежных элементов поз. 7. Дополнительно к приведенной схеме на станке устанавливается дорн поз. 11, закрепленный в пинולי задней бабки станка.

Таким образом головка обеспечивает накатку винтовой линии ребер на основное тело трубы с постоянной высотой ребер.

В качестве накатных роликов для оребрения использованы стандартные резбонакатные ролики М4, доработанные под нужный профиль ребер маслоохладителя путем шлифования канавок.

Схема доработки накатных роликов с исходными размерами и с размерами профиля для накатки после доработки приведена на рис. 3.

Габаритные размеры и вершины зубьев профиля изменениям не подвергались, но изменение профиля осуществлено путем шлифования впадин имеющегося профиля.

Связь конструктивно-эксплуатационного функционала профиля обрабатываемой трубы и технологического функционала профиля накатного ролика осуществляется путем соответствующего профилирования с учетом кинематических факторов структурной схемы обработки. Схема приведения конструктивного функционала трубы и функционала инструментально-технологического воздействия поясняется на примере на рис. 4а, б, в.

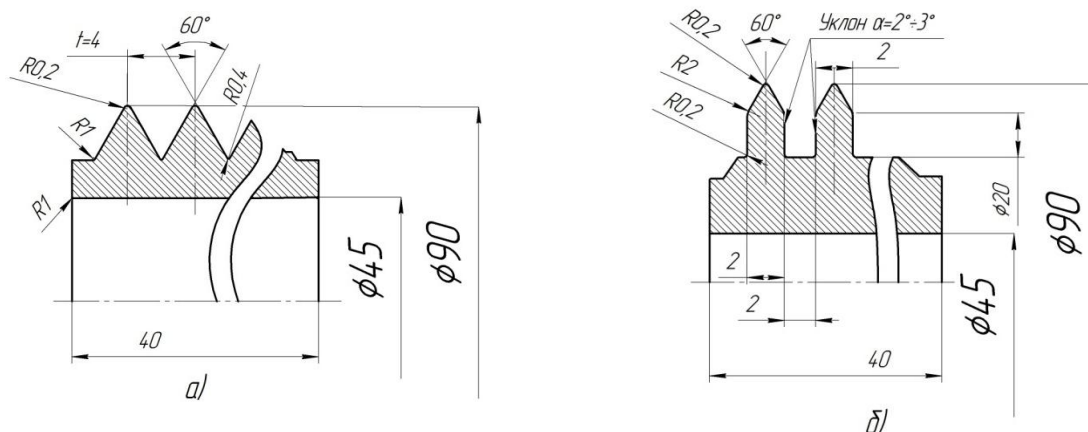


Рисунок 3. Вариант доработки ролика накатного для оребрения медной трубы.

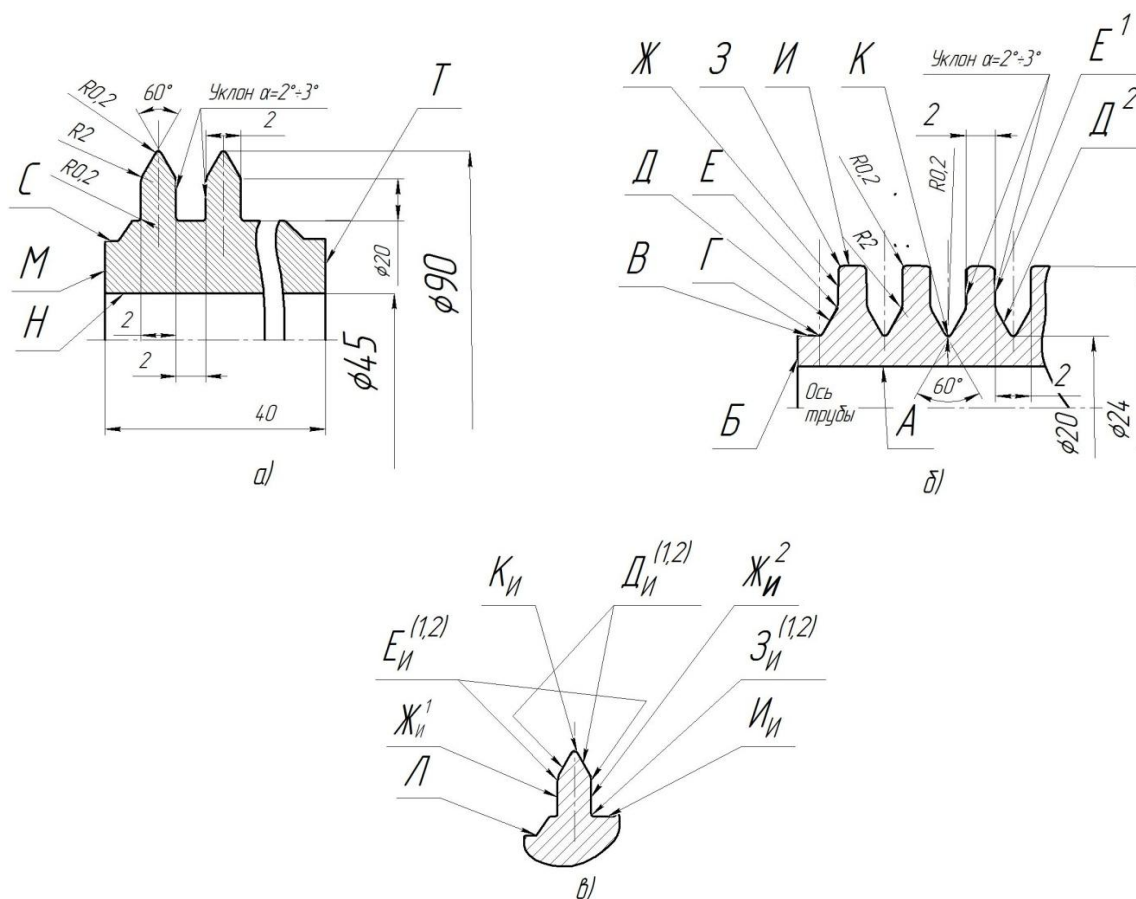


Рисунок 4. Пояснение к порядку установления взаимосвязи конструктивных признаков детали и значимых технологических элементов их формирования:

- а) размеры геометрических элементов ребер трубы; б) обозначение значимых конструктивных элементов трубы буквами русского алфавита; в) обозначение элементов инструмента технологической системы – поверхностей накатного ролика, соответствующих конструктивным элементам обрабатываемой трубы.

В соответствии с разработанной ранее системой [1] установления взаимосвязей конструктивных атрибутов детали и технологических атрибутов обрабатывающей технологической системы все поверхности детали обозначаются буквами русского алфавита с индексами для аналогичных поверхностей разных участков детали. На рис. 4б обозначены буквами поверхности ребер трубы, размеры которых приведены на рис. 4а. На рис. 4в буквами русского алфавита с индексами обозначены поверхности инструмента, которые принимают участие в формировании соответствующих буквенным обозначениям элементов ребер трубы. Индекс «И» означает отношение элемента и обозначения к инструменту (в данном примере к накатному ролику), а числовые верхние индексы означают отношение к аналогичным и зеркально расположенным поверхностям.

Поверхности А и Б не подвергаются инструментальному воздействию. А поверхности от В до Е с учетом всех переходных радиусных элементов и скруглений как раз подвергаются формирующему воздействию роликов. При этом в процессе образования ребристой винтовой поверхности трубы ролики накатной головки совершают вращательные движения вокруг своих осей, расположенных под скрещающимися углами  $3^\circ$  относительно центральной оси самой головки, совпадающей с осью трубы. Угол  $3^\circ$  соответствует подъему винтовой линии ребер с шагом 4мм. Медная труба в процессе оребрения также вращается вокруг собственной оси под воздействием сил трения между боковыми и торцевыми поверхностями накатных роликов и формируемой поверхности самой трубы, а осевая подача трубы на винтовой шаг – 4 мм/об, осуществляется с помощью суппорта станка. Подача устанавливается по нониусу суппорта, а вращение патрона, на котором устанавливается накатная головка с тремя роликами, осуществляется с минимальным числом – 12 об/мин.

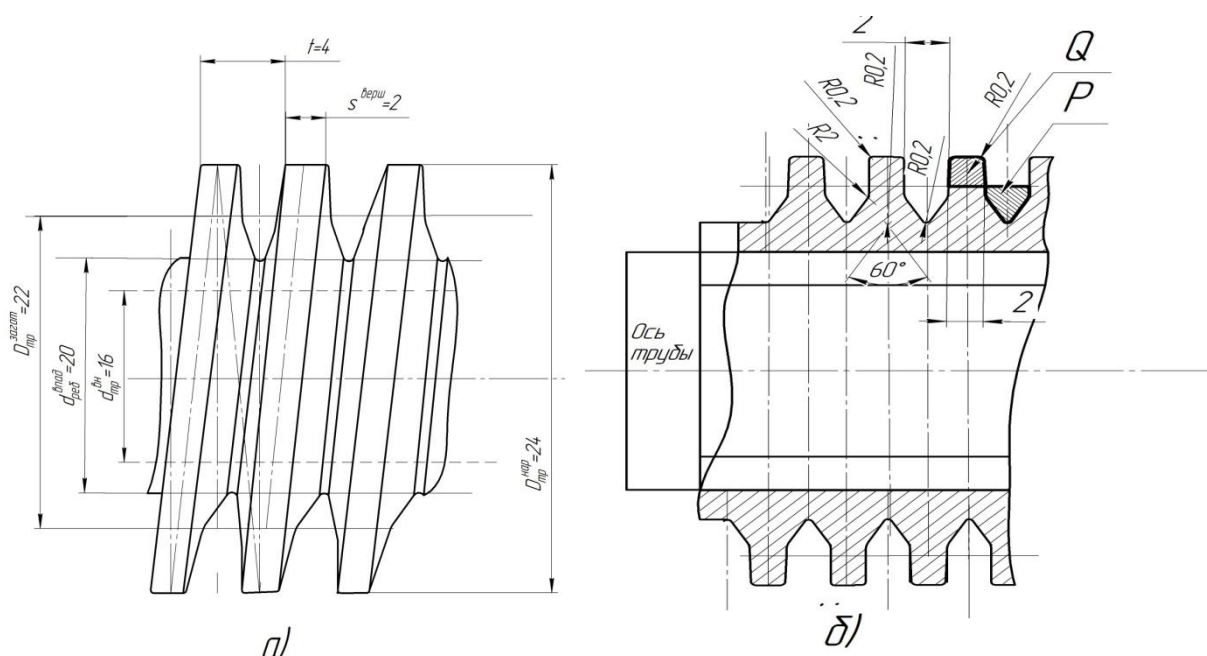


Рисунок 5. Эскиз профиля, обеспечиваемого перемещением объемов металла.

- а) вид готового профиля оребренной трубы в плане: б) сечение профиля с указанием замещаемых объемов при перемещении металла.

Правильная форма ребер трубы образуется за счет точного расчета перемещаемых объемов металла, как проиллюстрировано на рис. 5а, б. На рис. 5а иллюстрируется профиль ребер при виде в плане. Просматривается характерная кривизна боковой поверхности ребер, обеспечивающая минимизацию трения формирующих поверхностей при вращении роликов о поверхность металла формируемого профиля ребер. Указан наружный диаметр трубы-заготовки  $D=22$  мм, а также наружный диаметр оребренной трубы  $D=24$  мм, и диаметр впадин оребренной трубы  $D=20$  мм, а также внутренний диаметр заготовки и готовой трубы  $d=18$  мм.

На рис. 5б показан расчетный профиль ребер. При этом обозначен литерой  $P$  кольцевой объем  $V_P$  заготовки трубы, который при формировании ребер занимает кольцевой объем  $V_Q$ , обозначенный литерой  $Q$ . Условием успешного формообразования оребренной поверхности трубы и правильная геометрия ребер, соответствующая расчетам, является равенство кольцевых объемов металла  $P$  и  $Q$ , т.е.,  $V_Q = V_P$ .

В случае  $V_Q > V_P$  за счет недостатка металла для формирования профиля могут проявляться раковины и вырванные участки на боковых поверхностях и вершинах ребер, а также недостаточная чистота поверхности.

При  $V_P > V_Q$  образуется излишний металл при формировании профиля, который не может быть утилизирован в процессе накатки, что также приводит к ухудшению качества геометрии и поверхности оребренной трубы, к появлению задигов и наплывов на поверхности, а также является причиной возможных поломок накатной головки.

Обработанная таким образом оребренная труба имеет достаточно высокие показатели качества поверхности – шероховатость не более  $R_z 0,02$  мм. Наружная поверхность ребер и впадин при этом имеет упрочненный слой глубиной до 0,2 мм.

В большинстве случаев производства эксплуатационные свойства деталей определяются в процессе формирования геометрии, формы деталей [1, 2] с заданными размерами и поверхностью, обладающей определенными качественными показателями.

Расчетные параметры инструментов для каждого типоразмера труб определяются в каждом случае в зависимости от диаметров труб, наружных диаметров оребренной поверхности, толщины и высоты самих ребер. Диаметр трубы как заготовки для обкатки рассчитывается исходя из указанных требований к готовой детали, и расчет ведется с учетом перемещаемого объема путем вытеснения металла из одной зоны в другую. Описание порядка расчета требует изложения в отдельной работе.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования и результаты, изложенные в настоящей работе, позволили достичь поставленной цели и решить ряд следующих задач:

1. Приведены актуальные доводы в пользу необходимости изготовления оребренных труб для маслоохладителей двигательных агрегатов маневровых тепловозов методом накатки цельных медных труб.

2. Проведен укрупненный анализ возможных способов формообразования для создания геометрического профиля труб маслоохладителей, включая сравнительные способы метода накатки с применением плашки, и с применением накатной головки.

3. Установлены и приведены существенные конструктивно значимые признаки оребренных труб, являющиеся функционально значимыми при эксплуатации.

4. Установлен принципиальный укрупненный характер взаимосвязей между конструктивно значимыми функциональными признаками труб и технологическими признаками ФОТ-воздействий при помощи принятого инструментального обеспечения.

5. Установлены зоны локализации элементов и конструктивных атрибутов трубы и элементов инструментального обеспечения – накатных роликов с выделением формообразующих поверхностей роликов.

Таким образом, подтверждена актуальность разрабатываемой темы формирования оребрения труб маслоохладителей из цельной медной трубы методами холодной объемно-поверхностной деформации. При этом заложены основы для исследований и разработки научно-технической основы создания функционально-ориентированных технологий для изготовления деталей машиностроительной области с применением безотходных и малоотходных технологических процессов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 3 (70). С. 22-33. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

2. Михайлов А. Н. Предпосылки создания новой схемы механической зубчатой КПП с переключением без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 2 (69) 2020. С. 50-62. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

3. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. Донецк, ДонНТУ, 2009. -346с.

4. Михайлов А. Н. Синтез структурных схем функционально-ориентированного технологического воздействия при формообразовании и формировании поверхностных свойств деталей КПП / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2021. Вып. 2 (73). С. 53-67. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

5. Михайлов А. Н. Анализ деталей по функциональным признакам участков и зон согласно уровню и глубине технологического обеспечения целевой функции / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76). – С. 43-52. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

6. Аронсон К.Э. Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин [и др.]; по общей ред. Д-ра техн. Наук, проф. Ю.М. Бродова. 2-е изд. перераб. и доп. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 817с.

7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979, 416 с.

Поступила в редколлегию 10.03.2025 г.