

УДК 621.01

¹А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., ¹С. Б. Котляров, аспирант, ¹В. Б. Котляров, аспирант, ²Б. С. Котляров, канд. техн. наук

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

² Ялта, Россия

Тел: +7(988) 55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 704-53-62;

E-mail: tm@fimm.donntu.org; svetozar90@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru;

boris.kotlyarov@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КИНЕМАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАКАТКИ ОРЕБРЕНИЯ МЕДНЫХ ТРУБ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ

В настоящей работе изложены результаты исследований, проведенных на основе анализа кинематической цепи технологического обеспечения на предмет взаимодействия элементов оснастки и инструментов с заготовкой при формировании профиля оребрения трубы маслоохладителя методом накатки без снятия стружки. Разработана методика расчета геометрических элементов профилирующих роликов, учитывающая статические и динамические нагрузки, возникающие как в зоне взаимодействия накатных роликов с трубой в процессе профилирования, так и кинематической цепи при передаче соответствующих движений в процессе накатки на все подвижные элементы цепи. Приведены зависимости в формализованном виде, указывающие характер влияния ФОТ-воздействий, учитывающие влияние внутренних факторов кинематической цепи технологического обеспечения процесса (ТОП), на ФОС готовой детали согласно КД.

Ключевые слова: медная труба, оребрение, система координат, ФОТ-воздействие, функционально-ориентированные свойства (ФОС), кинематическая цепь, инструменты, формализация записи, сила воздействия.

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

METHOD OF CALCULATION OF KINEMATIC-DYNAMIC INTERACTION OF TECHNOLOGICAL SUPPORT ELEMENTS OF KNURLING OF COPPER PIPES OF OIL COOLERS

This paper presents the results of studies conducted on the basis of the analysis of the kinematic chain of technological support for the interaction of tooling elements and tools with the workpiece during the formation of the finning profile of the oil cooler pipe by rolling without chip removal. A method has been developed for calculating the geometric elements of the profiling rollers, taking into account static and dynamic loads that occur both in the zone of interaction of the rolling rollers with the pipe during profiling, and the kinematic chain when transmitting the corresponding movements during rolling to all moving elements of the chain. The dependencies are given in a formalized form, indicating the nature of the influence of PHOTO effects, taking into account the influence of internal factors of the kinematic chain of technological support of the process (TOP), on the FOS of the finished part according to the CD.

Keywords: copper pipe, finning, coordinate system, PHOTO-impact, functionally oriented properties (FOS), kinematic chain, tools, recording formalization, impact force.

1. Введение

Оребрение труб маслоохладителя возможно как методом механической обработки за счет удаления лишнего металла с заготовки, так и путем формирования требуемого профиля по указанной в КД геометрии без удаления металла.

Без удаления металла методом накатки профилирование можно осуществлять путем использования разных кинематических схем. В частности, профиль можно накатывать плашками, а можно накатывать роликами. При этом осуществляется взаимодей-

© Михайлов А.Н., Котляров В.Б., Котляров Б.С., Котляров С.Б.; 2023

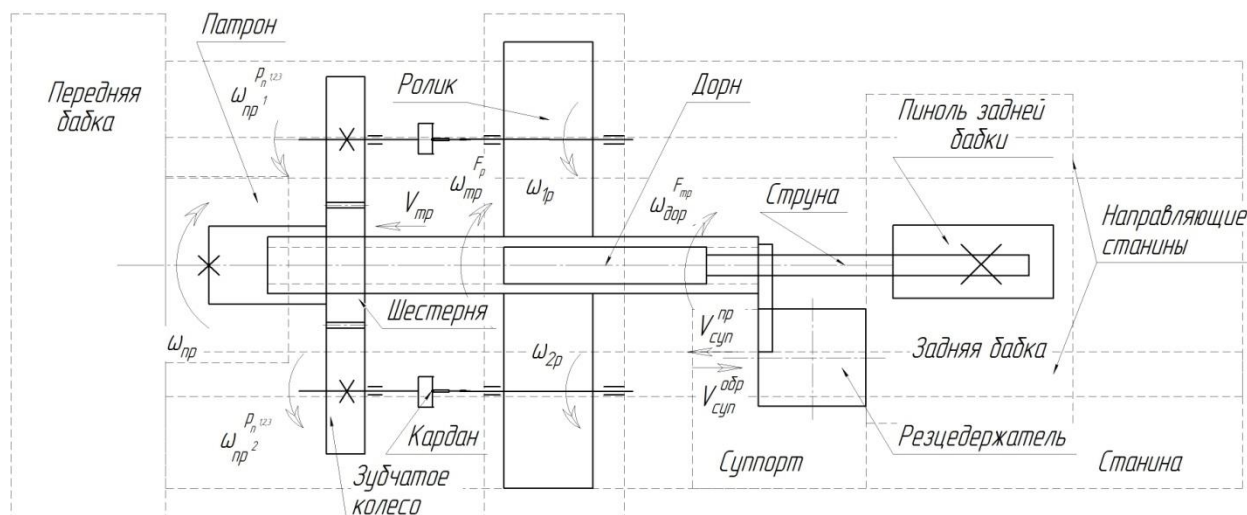


Рисунок 2. Кинематическая схема технологического обеспечения накатки профиля трубы

2. Цель и задачи

Целью настоящей работы является определение параметров технологического обеспечения для формирования заданных свойств детали отдельных участков и зон детали путем реализации процесса безотходного перемещения части материала в зоны детали методами холодной объемной и поверхностной пластической деформации - ХОПД.

Для достижения цели работы потребовалось решить ряд частных технических задач:

1. Разработать кинематическую схему осуществления процесса накатки профиля на трубу методом ХОПД;
2. Установить взаимодействующие элементы кинематической схемы и характер их взаимодействия, формализовать запись кинематических взаимоотношений элементов;
3. Установить динамические составляющие процесса профилирования и привести запись формальных силовых взаимоотношений элементов технологии;
4. Разработать алгоритм расчета технологической цепочки накатки ребер и порядок формализованной записи связей конструктивных свойств и признаков ФОТ-систем для реализации необходимых ФОС готовой детали.

3. Основное содержание

Система технологического обеспечения профилирования оребренных труб из меди для маслоохладителей, схема которой приведена на рис. 1 и рис. 2, представляет собой комплект отдельных элементов, объединенных обобщенной целевой функцией, и включает в себя:

- собственно технологическую машину для оребрения труб;
- объект труда – заготовку в виде медной трубы диаметром 22х 4 мм;
- схему энергетического обеспечения;
- схему управления процессом.

Рассмотрим, какие кинематические цепи и элементы должны присутствовать в технологической системе для того, чтобы обеспечить все необходимые относительные движения формирующих органов и заготовки, а также их силовые взаимодействия для обеспечения процесса профилирования труб.

Очевидно, что в качестве расчетной схемы следует рассматривать схему формообразования с линейчатым контактом [6], который осуществляется между формирующим роликом и профилируемой трубой в сечении плоскости, перпендикулярной оси трубы по витку линии подъема винтовой линии профиля. Условно схема рабочего сечения в зоне формообразования представлена на рис. 3.

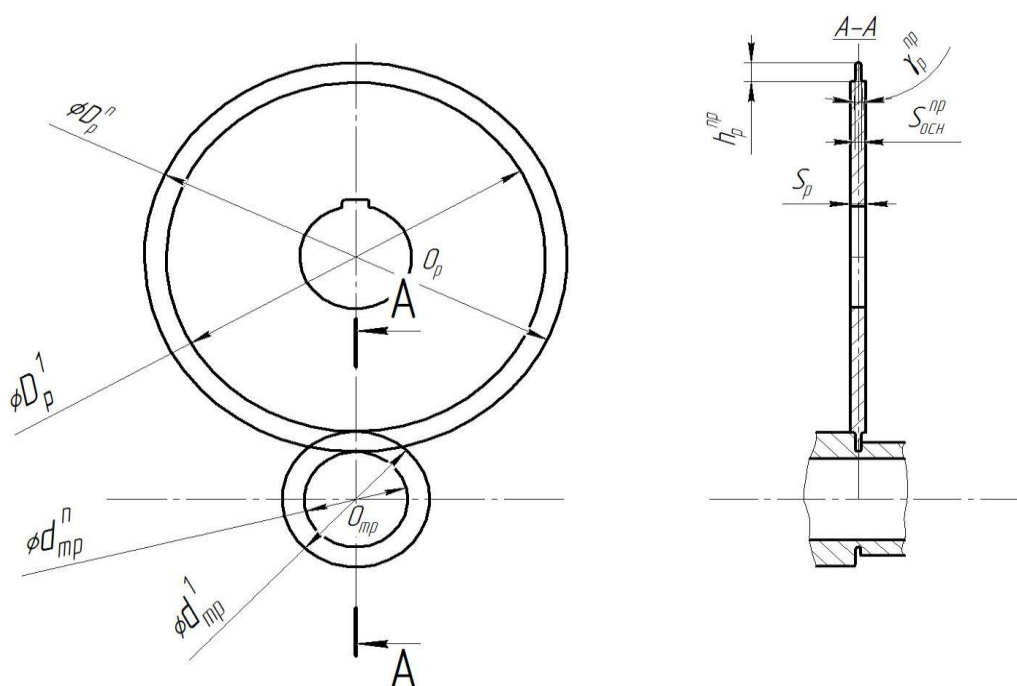


Рисунок 3. Схема сечения ролика и трубы в зоне контакта при профилировании витка

Кинематическое и силовое динамическое взаимодействие в рабочем сечении между контактирующими элементами и частями ролика и трубы представлено на рис. 4. и рис. 5.

Скорости в каждой точки линии контакта в плоскости зацепления ролика и профилируемой заготовки изменяется от V_1 до V_n и в каждой точке контакта происходит взаимное проскальзывание и за счет этого возникают силы сдвига, перемещающие металл заготовки в свободные зоны при профилировании. Величины сил в точках контакта переменные, изменяются по криволинейному закону, и ориентировочно эпюра распределения может быть представлена так, как на рис. 5.

Очевидно, что при вращении роликов ω_p^i с угловой скоростью для любой точки профиля, максимальная окружная скорость V_n присуща вершине профиля в n -й точке по сечению на рис. 4, и равна $V_n = \omega_p^i \times R_p^n$, где R_p^n - радиус крайней точки n на вершине профиля ролика. Эта точка профиля контактирует с точкой формируемого про-

филя на минимальном диаметре трубы, которая при вращении имеет минимальную окружную скорость V_{mp}^n , определяемую в виде:

$$V_{mp}^n = i_{cp}^{p-mp} \times \omega_p^n \times r_{mp}^n, \tag{1}$$

где i_{cp}^{p-mp} - передаточное отношение от вращающихся роликов вращающейся от сил трения трубе-заготовке.

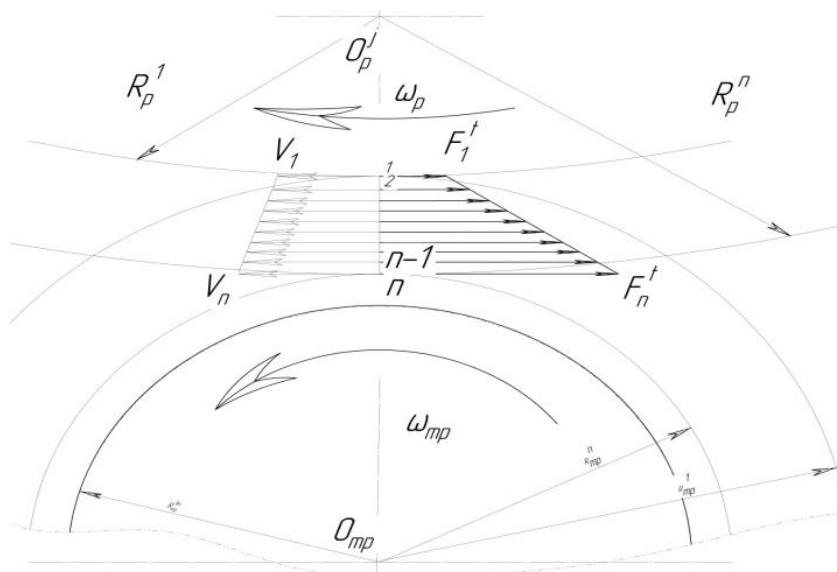


Рисунок 4. Направление действия скоростей и силового взаимодействия в рабочем сечении схемы формообразования

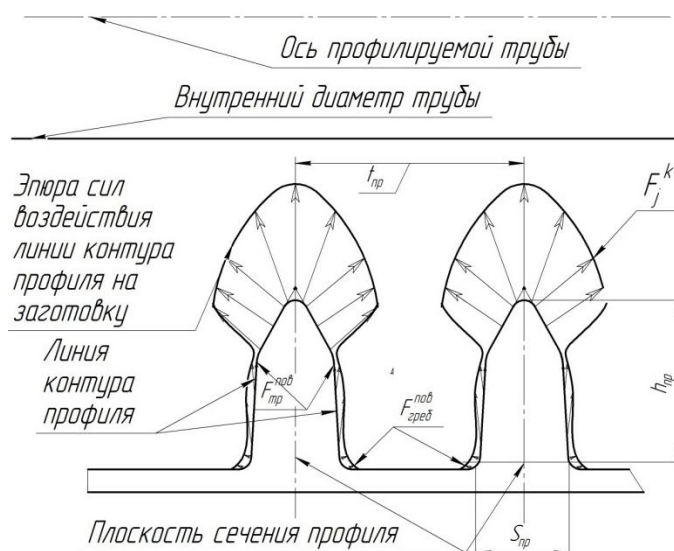


Рисунок 5. Силовое действие контура профиля на металл профилируемой трубы в сечении плоскости взаимодействия

При этом максимальная разность радиусов крайних контактирующих с заготовкой точек профиля роликов составляет величину высоты профиля, т. е. $R_p^n = R_p^1 + h_p^{np}$. В таком же соотношении отличаются максимальный и минимальный радиусы контактных точек витков профилируемой трубы, $r_{mp}^1 = r_{mp}^n + h_{mp}^{np}$, при этом $h_h^{np} = h_{mp}^{np}$.

Исходя из предположения, что от средней точки контакта точек на профиле трубы и точек контакта роликов направление проскальзывания направлены в обратные стороны, в средней точке проскальзывание отсутствует. В средней точке профилей окружная скорость ролика V_p^{cpTnp} и окружная скорость трубы V_{mp}^{cpTnp} равны:

$$V_p^{cpTnp} = V_{mp}^{cpTnp} = \omega_p \times (R_p^n - \frac{1}{2} h_p^{nTnp}), \text{ где } h_p^{np} = h_{mp}^{np} - \text{высота профиля ролика и}$$

трубы.

Длина линии одновременного контакта ролика с заготовкой в процессе накатки профиля обозначим $l_{кон}$ и состоит она из всех участков профиля от дна до вершины витка. В зонах контакта боковых поверхностей формирующих профиль роликов с заготовкой в среднем толщина деформируемого слоя $\Delta_{деф}$ материала составляет 0,3- 0,4 мм. Усилие $F_{см}$ смятия и сдвига слоя материала в процессе профилирования определяется в виде:

$$F_{см} = l_{кон} \times \Delta_{деф} \times S_{сеч} \times E_M, \quad (2)$$

где E_M – модуль упругости (допускаемое усилие сдвига) для меди.

Необходимо отметить, что в выражении (2) дано обобщенное представление сил, воздействующих поверхностями формирующего ролика на формируемый материал трубы при оребрении. Часть поверхности ролика, вершина которого оформленная в виде клина, вдавливающегося в поверхность трубы, выдавливает материал из общего объема, составляющего стенку трубы, в пространство над поверхностью трубной заготовки, при этом происходит частичное уплотнение материала. В этих зонах профиля, относящихся к вершинам профиля в плоском сечении, существенное значение имеют силы, нормальные к поверхностям ролика в зонах контакта. В зонах поверхностей роликов, относящихся условно к основаниям (как указано в плоском сечении на рис. 4 и на рис. 5), поверхности профилей выполняют роль ограничивающих элементов. Они формируют гребенчатый профиль оребрения трубы маслоохладителя с развитой поверхностью охлаждения. При этом усилия давления металла по нормальным направлениям к поверхностям практически отсутствуют. В большей степени проявляется действие усилий трения по поверхностям роликов у основания, которые формируют геометрию ребер и выглаживают поверхности, преодолевают возмущающие силы сопротивления при трении. Такое взаимодействие сил трения по стенкам ребер профиля способствует повышению чистоты и качества поверхностей профильных элементов, вследствие чего повышаются эксплуатационные свойства труб маслоохладителя.

Следует отметить, что диаметры вершин формообразующих роликов имеют разные величины от минимального размера до максимального - в средней части набора. Из-за этого взаимодействие роликов с заготовкой происходит по-разному. Общий характер силового взаимодействия при контакте поверхностей роликов и трубной заготовки, а также характер наружных поверхностей гребней при образовании профилей трубы представлен на рис. 6.

На разных роликах возникают разные реакции материала от поверхности трубы-заготовки на накатные ролики, что обусловлено, главным образом, разной величиной глубины вдавливания вершин роликов в тело трубы и разной толщиной слоя материала на боковой поверхности профилей, перемещаемого в свободное пространство.

Так на рис. 6а приведена схема воздействия сил от роликов на зону трубы, которая находится между двумя боковыми поверхностями самих роликов. При этом в процессе пластической деформации материала под воздействием раздвигающего клина ролика силы действуют на внутренний диаметр трубы-заготовки, а вследствие контакта трубы с дорном возникает реакция по перпендикулярному направлению к трубе. Благодаря этим силам металл перемещается от средней части к периферии трубы и формируется верхняя наружная поверхность гребня профиля.

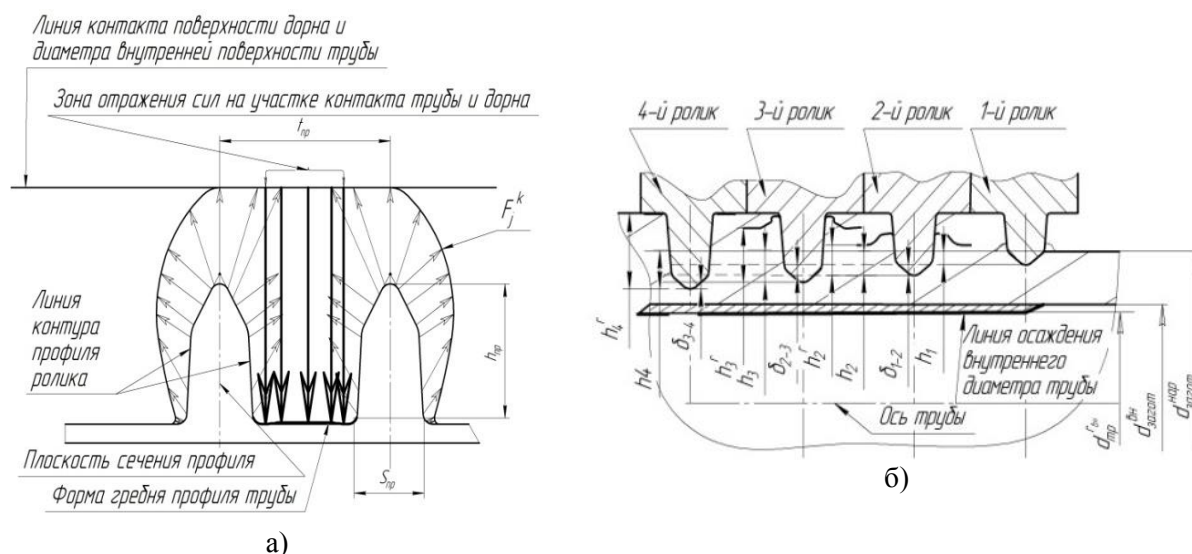


Рисунок 6. Воздействие сил на реальный профиль и формирование границ поверхностей гребней и боковых поверхностей профиля.

- а) прямые и отраженные силы взаимодействия;
- б) линии границ элементов при последовательном воздействии роликов разных диаметров по возрастающей

На рис. 6б последовательно представлен процесс врезания первых роликов в трубу-заготовку, где на первом ролике выдавливается минимальный объем металла, на втором ролике с большим диаметром происходит более глубокое внедрение ролика в металл трубы, а на третьем формирующем ролике уже происходит выдавливание металла к боковым поверхностям роликов. Далее контакт осуществляется с калибрующими роликами – с 4-го по 7-й, при контакте которых с трубой формируется окончательный размер элементов профилированной трубы маслоохладителя. При минимальном диаметре вершины 1-го ролика D_{\min}^{P1} размер по вершинам последующих роликов возрастает на величину δ_{1-2} , δ_{2-3} , δ_{3-4} для 2-го, 3-го и 4-го роликов соответственно. При этом для канавок роликов диаметр $D_{\text{вн}}^P$ для всех роликов одинаков, контакт выдавливаемого с поверхностью дна первых трех роликов не происходит.

Весь порядок и последовательность расчета функционально-ориентированных свойств технологической системы профилирования труб охлаждения можно представить в виде алгоритма на рис. 7.

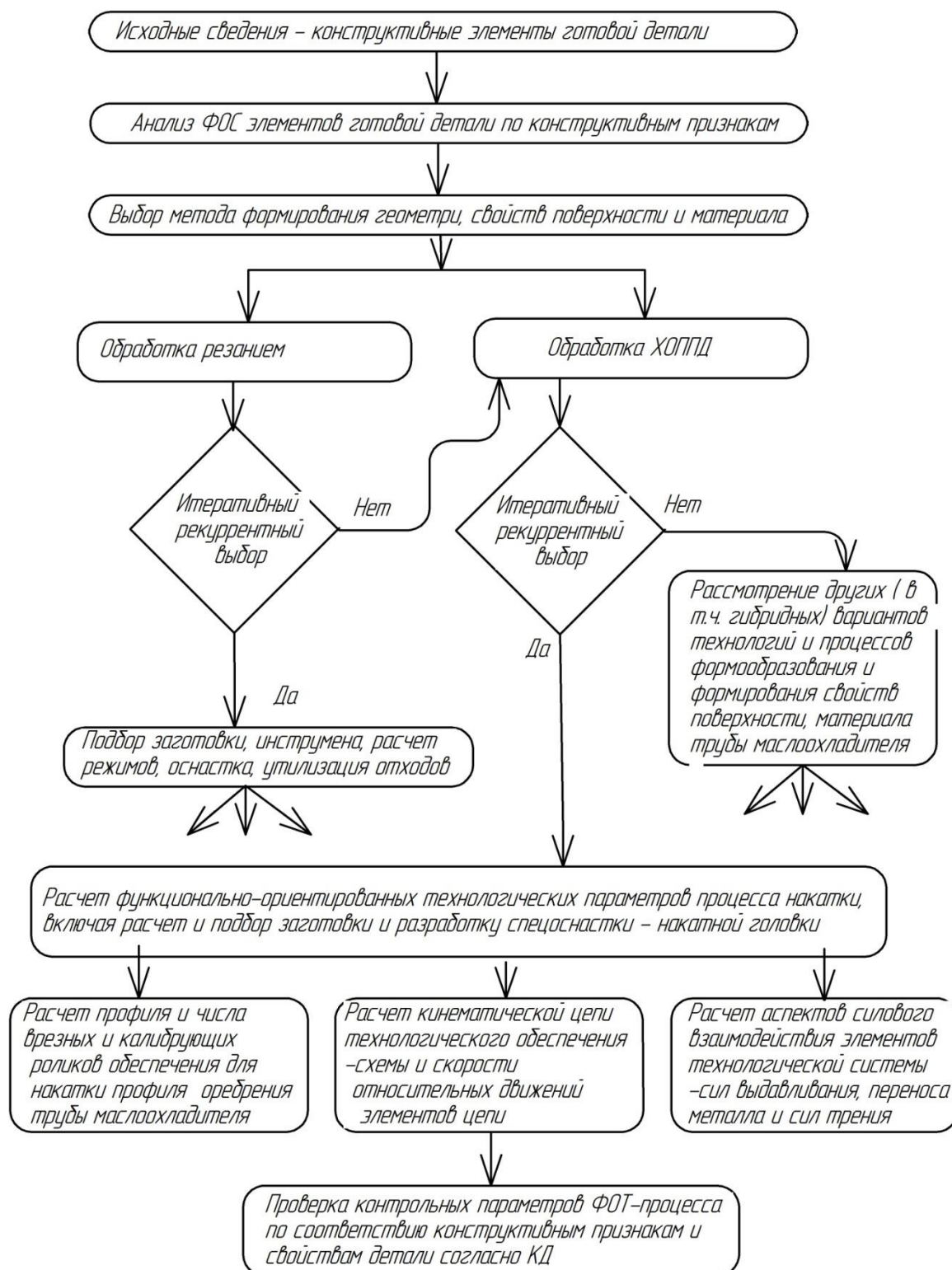


Рисунок 7. Алгоритм разработки ФОТ-процесса оребрения труб маслоохладителя

Расчет диаметров заготовки и роликов, а также ширины канавок между роликами осуществляется исходя из объемов перемещаемого металла с учетом изменения величин диаметров, как вершин профиля, так и изменения диаметра внутренней поверхности трубы-заготовки, контактирующей с дорном.

Учитывая то, что обобщенное усилие $F_{см}$ воздействия на трубу можно представить выражением (1), можно записать окружное усилие F_{τ} через расчетное усилие $F_{см}$ в виде:

$$F_{\tau} = F_{см} \times \kappa_{м} \times r_{рол}^{ср}, \quad (3)$$

где $r_{рол}^{ср}$ - средний диаметр боковой поверхности площади контакта ролика с трубой, а $\kappa_{м}$ – коэффициент трения при контакте ролика и трубы по среднему диаметру.

После выполнения расчетов всех параметров конструктивных элементов, включенных в технологическую систему накатки ребер, а также расчета параметров кинематической и динамической схемы взаимодействия каждого накатного ролика с трубой-заготовкой в процессе формообразования витков и формирования поверхностных свойств можно считать задачу создания ФОТ-процесса накатки ребер решенной.

Заключение.

Результаты проведенных в настоящей работе исследований позволили получить решение ряда поставленных задач и достичь намеченной цели.

Решен ряд следующих частных задач:

1. Разработана кинематическая схема осуществления процесса накатки профиля на трубу методом ХОППД, которая включает необходимые механизмы приводов движения подвижных элементов технологической системы с учетом величин передаточных отношений по всей кинематической цепи;

2. Установлен комплекс элементов кинематической схемы и характер оформления конструктивных элементов их взаимодействия, приведена формализация записи кинематических взаимоотношений элементов технологической цепи;

3. Установлены динамические составляющие функционально-ориентированной технологической системы для реализации процесса профилирования трубы и приведена система записи формальных силовых взаимоотношений элементов технологии;

4. Разработан алгоритм расчета технологической динамико-кинематической цепи накатки ребер и порядок формализованной записи связей конструктивных свойств и признаков ФОТ-систем для реализации необходимых ФОС готовой детали.

Таким образом, в настоящей работе решен ряд частных задач общей методической части общей системы разработки ФОТ изготовления деталей машиностроительного комплекса методами ХОППД, в частности, с применением безотходных технологий формообразования и формирования ФОС. Приведен порядок проведения расчетов и дан алгоритм разработки технологической системы для накатки труб маслоохладителей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 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 техноло-

гии и системы машиностроения: Международный сборник научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76). – С. 43-52. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

2. 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.

3. Михайлов, А. Н. Обеспечение свойств и структуры материала детали с помощью функционально-ориентированного технологического воздействия / 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. № 3(74). – С. 38-49. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

4. Миропольский, Ю. А. Накатывание резьб и профилей / Ю.А. Миропольский, Э. П. Луговой – М.: Машиностроение, 1976. – 175 с.

5. Адакин, В. А.. Инструмент для многопроходного холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Адакин: Санкт-Петербург – 2014.

6. Михайлов, А. Н. К вопросу синтеза функционально-ориентированных структурных схем формообразования с использованием линейчатого контакта инструмента и заготовки / 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. № 4(75). – С. 38-58. – ISSN 2073-3216, (E)ISSN2518-7120

7. Михайлов, А. Н. Порядок технологического обеспечения разработки ФОТ оребренных медных труб маслоохладителей маневровых тепловозов / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б., Пичко А. П. // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – С. 186-194.

Поступила в редколлегию 16.03.2023г.