

ОКУЛОВ РОМАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ
ГРАНЕННЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЧАГА
ДЕФОРМАЦИИ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ТОЧНОСТИ**

Специальность

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Металлургические и роторные машины» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Паршин Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Выдрин Александр Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
ОАО «Российский научно-
исследовательский институт трубной
промышленности» (г. Челябинск),
заместитель генерального директора по
научной работе

Железков Олег Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический университет
имени Г.И. Носова» (г. Магнитогорск),
профессор кафедры «Механика»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет»
(национальный исследовательский
университет), г. Челябинск

Защита состоится 03 декабря 2015 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»:
<http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=243046>.

Автореферат разослан «30» октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Раскатов Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди приоритетных направлений развития промышленности и роста конкурентоспособности экономики Российской Федерации выступают повышение качества продукции и энергоэффективность процессов. Для достижения поставленных задач необходимо создание и внедрение передовых ресурсосберегающих технологий и оборудования для производства наукоемкой продукции. Реальный сектор экономики требует проведения модернизации и переоснащения, внедрения инновационных технологий. Профильные трубы широко используются во многих отраслях промышленности: машиностроение, строительство, приборостроение, нефтегазовая отрасль, авиакосмическое кораблестроение, атомная энергетика и др. Такое использование профильных труб обусловлено присущим их форме свойствам, которые позволяют экономить материал, облегчая конструкции, при сохранении прочности и улучшении внешнего вида. Значительную часть конструкций составляют профильные трубы. Есть области индустрии, в которых без специфических свойств профильных труб не обойтись. Современный рынок, предъявляя высокие требования к качеству трубной продукции, требует постоянное создание новых видов, при повышении уровня производительности и энергоэффективности процессов производства. В связи с широким использованием профильных труб и требованиями рынка, актуальным моментом являются установление влияния различных факторов на качество труб и процесс профилирования, а также совершенствование действующего производства с целью повышения точности: разработка рабочего инструмента рациональной формы, оснастки, машин и оборудования, внедрение новых технологий их функционирования. Для круглых труб, как правило, нормируются наружный диаметр и толщина стенки. Особенности формы профильных труб определяют большее количество нормируемых размеров. Это обуславливает необходимость проведения обширного анализа влияния условий обработки на точность их размеров. Потребность в решении указанных выше задач определяет актуальность темы работы.

Работа проведена по плану научно-исследовательских работ ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», по госбюджетной теме «Разработка теоретических основ технологии и оборудования, обеспечивающих производство новых видов металлопродукции для нефтегазовой промышленности и теплоэнергетики».

Цель диссертации. Цель данной работы состоит в разработке моделей очага деформации при изготовлении многогранных труб для совершенствования процессов профилирования труб, машин, формы рабочего инструмента для получения труб с заданной геометрией и требуемой точностью их размеров, а также анализ энергозатрат процесса.

Задачи исследования.

1. Определить влияние вариаций размеров поперечного сечения заготовки (диаметра и толщины стенки) на форму изделия, на его геометрические параметры, среди которых прогиб стенки в центре грани, радиусы сопряжения по наружной и внутренней поверхностям трубы, площадь поперечного сечения, вытяжка. Следует также установить, как влияет геометрия заготовки на энергосиловые параметры процесса производства профильных труб, а именно усилие волочения, работу деформации, энергоемкость процесса. Требуется определить зависимость вариаций геометрии заготовки и других параметров на интенсивность деформации.

2. Установить влияния особенностей рабочего инструмента (тип волоки, угол наклона ее обжимного участка, размер калибрующего участка, радиус перехода от обжимного участка к калибрующему) на геометрические параметры готового изделия, энергосиловые и деформационные показатели процесса.

3. Установить влияния технологических параметров (коэффициент трения, использования дополнительных усилий, прилагаемых к трубе во время обработки, материал, использование оправки, количество граней) на указанные выше показатели готовой трубы и процесса деформации.

4. Управлять формой готовой трубы за счет направленного варьирования параметрами процесса. Обладая знаниями о влиянии геометрии заготовки, особенностей рабочего инструмента и технологических параметров процесса следует подобрать такие условия, при которых обработанная труба и технологический процесс обладал набором требуемых качеств.

5. Определить состав оборудования, форму рабочего инструмента и параметры технологии обработки, позволяющие получать трубы требуемой формы и точности, снизить расходы энергии при их производстве.

Научная новизна.

1. Разработаны твердотельные и конечно-элементные модели очага деформации, адекватно отражающие его геометрию и учитывающие упругие и пластические с упрочнением свойства материала и контактное взаимодействие в очаге деформации, а также особенности приложения технологических усилий к трубе при различных случаях ее нагружения.

2. Установлено влияние факторов, относящихся к размерам заготовки, форме рабочего инструмента, особенностям процесса профилирования на формоизменение изделия, интенсивность деформации и энергосиловые параметры процесса обработки.

3. Найдены рациональные диапазоны значений определяющих факторов, выбор и регулирование которых позволяет осуществлять управление процессом обработки с целью получения заданной геометрии профилируемых труб, требуемой точности их размеров и снижения энергоемкость технологического процесса.

Практическая значимость работы. На основании полученных результатов теоретического и экспериментального исследований разработаны рекомендации по ведению процесса профилирования. Предлагаемые рекомендации относятся к выбору параметров формы рабочего инструмента, особенностям заготовки и технологии процесса, а также выбору оборудования. Задавая параметры процесса при проектировании или регулируя их непосредственно при ведении процесса профилирования становится возможным управлять точностью размеров поперечного сечения профильных труб, снизить энергоемкость процесса, контролировать деформационные показатели.

Методы исследований. В работе показано, что для теоретического исследования влияния различных факторов на формообразование изделия, его деформационные показатели, а также на энергосиловые показатели процесса волочения профильных труб наиболее рациональным является использование программного пакета, основанного на методе конечных элементов. Применение этого метода позволило определять формоизменение обрабатываемых труб, а также энергосиловые, деформационные и другие параметры процесса. Данный метод базируется на обобщённом вариационном принципе. При этом для каждого из этих элементов разбиения решаются уравнения, описывающее напряженно-деформированное состояние.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов обеспечена корректным применением методов теории обработки металлов давлением, апробированных методов твердотельного и конечно-элементного моделирования процесса, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических расчетов и натурального экспериментов процесса профилирования граненых труб и данными, приведенными в исследованиях других авторов.

Личный вклад соискателя. Заключается в постановке задач исследования, разработке твердотельной модели процесса профилирования граненых труб; проведении анализа влияния исследуемых процессов и режимов обработки; разработке методик оценки точности вычислительного эксперимента и выбора размера элемента разбиения сетки конечных элементов; проведение экспериментальных исследований волочения четырех- и шестигранных труб; разработке рекомендаций по ведению процесса, выбору формы рабочего инструмента, а также особенностей влияния заготовки для получения профильных труб заданной геометрией с требуемой точностью размеров и минимальными затратами энергии на изготовление.

Реализация работы. Материалы по изучению формоизменения представляют практическую ценность при отработке процессов формообразования профильных труб на ОАО «Уральское производственное предприятие «Вектор». Результаты переданы этой организации для изготовления оборудования, позволяющего производить прецизионные прямоугольные трубы требуемой формы.

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе при обучении студентов ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по курсам – «Пакеты прикладных программ», «Математическое моделирование», «Системы автоматизированного проектирования».

Соответствие паспорту специальности. В соответствии с формулой специальности диссертационная работа является прикладным исследованием, направленным на изучение и формулирование закономерностей пластического деформирования профильных труб из различных материалов с целью создания технологий, позволяющих производить изделия высокого качества путем прогнозирования результатов обработки на стадии проектирования процесса, а также управляя значениями варьируемых параметров во время ведения процесса обработки; исследование связей системы заготовка-рабочий инструмент-машина с целью определения рекомендации по выбору рациональных способов приложения к заготовке деформирующих сил, конфигурации рабочего инструмента, особенностей заготовки, позволяющие повысить качество продукции при снижении энергозатрат на производство; установление рекомендации по ведению процесса и выбору оборудования, способного реализовать разработанные технологии. Полученные результаты соответствуют паспорту специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением.

Апробация. Основные результаты исследования опубликованы в ряде научно-технических изданий доложены и обсуждены на конференциях различного уровня, в том числе, I международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (Череповец, 2013 г.), I международной научно-практической конференции «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2012 г.), VII международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» (Екатеринбург, 2013 г.), II международной научно-практической конференции «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2013 г.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований и приложения. Работа содержит 152 страницы, включая 43 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели, указаны научная и практическая значимость и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе работы выполнен обзор сортамента профильных труб и разработана их подробная классификация. Рассмотрены способы и устройства для производства профильных труб на основании проделанного литературного и патентного обзора современного состояния трубной промышленности. Приведен анализ достоинств и недостатков рассмотренных способов.

Современный рынок трубной продукции предъявляет производителям высокие требования к качеству. Выполнен анализ требований к качеству профильной трубной продукции, таких как точность размеров поперечного сечения и состояние поверхности. Показано, что показателей, определяющих геометрию профильных труб, больше, чем для круглой трубы. Отклонение размеров также нормируется по большему их количеству. На рисунке 1 представлены схемы поперечных сечений шестигранной и прямоугольной труб.

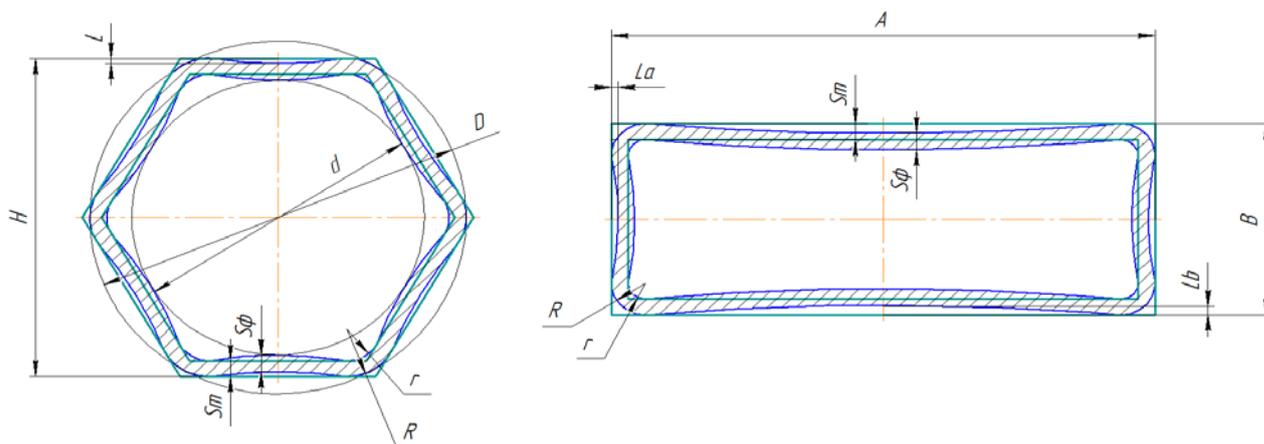


Рисунок 1 – Поперечные сечения шестигранной и прямоугольной трубы: L – прогиб стенки в центре грани; D и d – диаметры описанной и вписанной окружностей; S_m и S_ϕ – теоретическая и фактическая толщины стенки; R и r – радиусы сопряжения граней по наружной и внутренней поверхностям; H – высота многогранника; A и B – ширина и высота грани трубы, La и Lb – прогибы стенки в центре грани по ширине и высоте.

На качество трубной продукции оказывает влияние множество факторов – износ рабочего инструмента, марка материала трубы и другие. Как показала практика производства трубной продукции, точность размеров зависит от большого количества факторов, влияние которые колеблется как для одной трубы, так и различных труб в партии. При этом, факторы, которые оказывают воздействие на размеры, подвержены случайным колебаниям. Вариации значений параметров процессов и влияние их на точность размеров и форму изделия значительны. Допустимо рассматривать каждый из размеров как случайную величину, которая подчиняется нормальному закону Гаусса.

Для решения проблемы управления размерами профильных труб требуется установить закономерности их пластического деформирования с целью создания технологий, позволяющих производить изделия высокого качества, путем прогнозирования результатов обработки на стадии проектирования процесса, а также управляя значениями варьируемых параметров во время ведения процесса обработки.

Приведен анализ методов теоретического исследования параметров очага деформации процессов обработки металлов давлением. Были рассмотрены следующие методы: «инженерный», линий скольжения, сопротивления материалов пластической деформации, баланса работ, вариационный и метод конечных элементов (МКЭ). Приведен анализ достоинств и недостатков указанных методов.

В результате литературного и патентного обзора выявлено, что значительный вклад в исследование данной тематики сделан отечественными и зарубежными учеными, среди которых: А.А. Богатов, Г.Я. Гун, В.Н. Данченко, А.И. Дорохов, М.З. Ерманок, В.Р. Каргин, В.Л. Колмогоров, А.П. Коликов, В.С. Паршин, С.В. Паршин, И.Л. Перлин, П.И. Полухин, И.Н. Потапов, Б.А. Романцев, Н.В. Семенова, Г.А. Смирнов-Аляев, В.И. Соколовский, В.А. Спиридонов, В.В. Швейкин, Е.В. Шокова, А.К. Шурупов и др.

Итогом стала постановка задач исследования для совершенствования процесса волочения граненых труб с целью повышения точности их размеров на основе выбора параметров заготовки, формы рабочего инструмента, технологии производства и оборудования.

Во втором разделе на основании проведенного обзора известных методов теоретического исследования решения задач по определению параметров деформированного состояния металла выбран МКЭ. Среди известных методов реализации МКЭ в работе использованы специализированные программные пакеты ANSYS и DEFORM.

В качестве исследованных материалов рассмотрены: медь М2, латунь Л63, сталь 10, сталь 20, сталь 12Х18Н10Т, технически чистый титан ВТ1-0.

Условия контактного взаимодействия между элементами заданы согласно закону Амонтона-Кулона, при помощи коэффициента трения k для соответствующей пары трения.

Как показала практика производства профильных труб, что для обеспечения требуемой точности необходимо учитывать их упругие деформации, в частности после выхода изделия из волочильного канала, при котором грани трубы претерпевают упругое последствие и распруживаются.

В этой связи рассматривалась задача, в которой учтены как пластические, так и упругие деформации труб. Упругие свойства материалов задавали с использованием соответствующего значения модуля упругости Юнга.

Для описания пластических свойств материала использовали модель нелинейно упрочняющейся среды

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + gA^b, \quad (1)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа; A – степень деформации сдвига; g и b – эмпирические коэффициенты.

Как известно, конечно-элементное решение осуществляется на основании вариационного уравнения, заменяющего дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях и граничные условия, справедливого для любого распределения напряжений σ_{ij} , уравновешенного внешними нагрузками p_i и для любого поля перемещений U_i с соответствующими ему распределением деформаций.

Используя последовательность вывода, предложенную С.В. Паршиным, получим вариационное уравнение, учитывающее упругие и пластические деформации. Результирующий потенциал работы деформации может быть представлен в виде суммы потенциала работы деформации линейной упругой среды Π_{yn} и потенциала работы пластической деформации для среды с упрочнением Π_{nl} . В свою очередь, потенциал работы упругой деформации равен

$$\Pi_{yn} = \frac{\Delta^2}{6k} + \frac{G\Gamma^2}{2}, \quad (2)$$

где Γ – накопленная степень деформации сдвига; $k = \frac{1-2\mu}{E}$ – коэффициент объемного сжатия.

Потенциал работы пластической деформации равен

$$\Pi_{nl} = \frac{\Delta^2}{6k} + \int_0^\Gamma T(\gamma) d\Gamma, \quad (3)$$

где $T(\gamma)$ – текущее значение интенсивности деформации сдвига.

В согласно Качанову Л.М. справедлива форма равновесия тела, характеризующая минимумом полной энергии, части которой находятся в двух состояниях

$$\delta \left\{ \iiint_{V_{yn}} \Pi_{yn} dV_{yn} + \iiint_{V_{nl}} \Pi_{nl} dV_{nl} - A \right\} = 0, \quad (4)$$

где A – работа внешних сил, V_{yn} и V_{nl} – части всего объема тела, находящиеся, соответственно, в упругой и пластической зонах.

Учет работ внешних сил включает в себя работу сил трения A_{mp} , которая по Тарновскому И.Я., определяется как

$$A_{mp} = \iint_{S_K} \tau_K U_K dS_K, \quad (5)$$

где τ_K – напряжение контактного трения, U_K – относительное перемещение тела, S_K – площадь контакта.

Обобщая представленные выше формулы (2-5) получаем вариационное уравнение

$$\delta \left\{ \iiint_{V_1} \left[\int_0^r T(\gamma) d\Gamma \right] dV_1 + \frac{1}{2} \iiint_{V_2} G\Gamma^2 dV_2 + \iiint_V \frac{\Delta^2}{6k} dV - \iint_S p_i U_i dS \right\} = 0 \quad (6)$$

Решение подобного рода уравнения в конечно-элементной постановке возможно лишь с применением электронных вычислительных машин, которые обеспечивают операцию вычисления при помощи ведения расчетов на специализированных программных пакетах. Использование данного метода позволило установить не только формоизменение обрабатываемых объектов, но и энергосиловые, деформационные и прочие параметры процесса.

Моделирование очага деформации процесса профилирования труб проходило в несколько этапов: создание трехмерных моделей деталей, участвующих в процессе; задание граничных условий и свойств материалов; определение степеней свободы, задание движения и приложения нагрузки; задание параметров вычисления программного комплекса. После этого выполнялся расчет с последующей обработкой полученных результатов.

Рассмотрели возможные режимы профилирования труб: волочение без оправки, оправочное волочение, волочение с противонатяжением, проталкивание, проталкивания с подпором, волочения с использованием дополнительного проталкивающего усилия. Схемы изученных очагов деформаций представлены на рисунке 2.

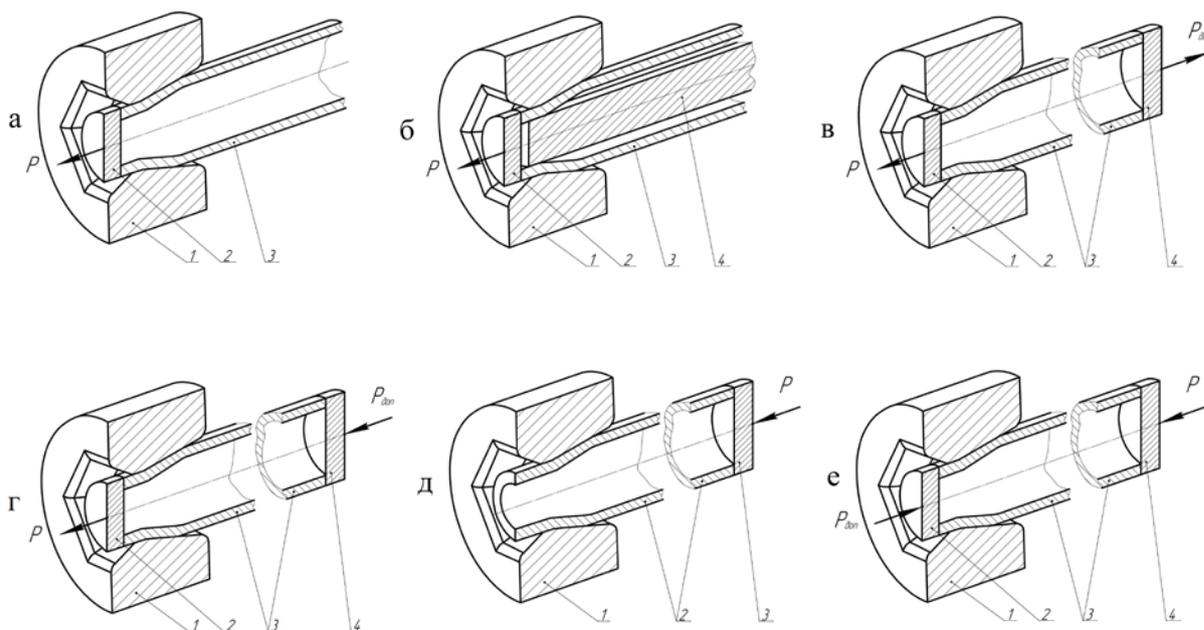


Рисунок 2 – Схема очага деформации процесса профилирования
а – безоправочное волочение; б – оправочное волочение; в – волочение с противонатяжением; г – волочение с проталкивающим усилием; д – проталкивание; е – проталкивание с подпором; 1 – волока; 2 – тяга; 3 – труба; 4 – контр тяга; P – усилие обработки; $P_{доп}$ – дополнительная нагрузка.

При создании объемной модели волокна, необходимо учитывать особенности ее формы. Рабочая поверхность волокна имеет обжимной и калибрующий участки. Конфигурация обжимного участка волокна может принимать различные формы. Наибольший интерес представляет типы форм, которые используются в практике. При исследовании рассмотрели три типа форм волоочильного канала:

- волокна 1 типа (рис. 3 а), обжимной участок которой выполнен в виде усеченной пирамиды с плоскими гранями;
- волокна 2 типа (рис. 3 б), имеющая обжимной участок, плавно переходящий от конуса к многограннику;
- волокна 3 типа (рис. 3 в) – с обжимным участком в виде усеченного конуса, который сопрягается с калибрующим участком.

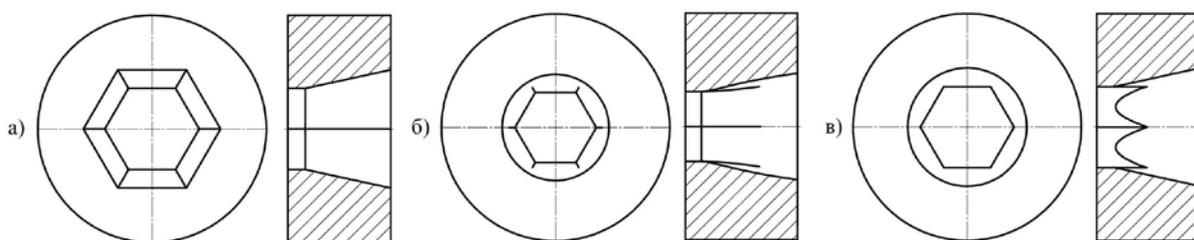


Рисунок 3 – Схемы рабочего инструмента с различным исполнением форм волоочильного канала: а – 1 типа; б – 2 типа; в – 3 типа.

Для решения поставленной задачи необходимо моделировать очаг деформации. Приняли ряд допущений, применение которых на достоверность результаты расчетов не оказывала фактического влияния, что было подтверждено результатами натуральных экспериментов. На рисунке 4 изображена твердотельная модель очага деформации с конечно-элементной сеткой разбиения.

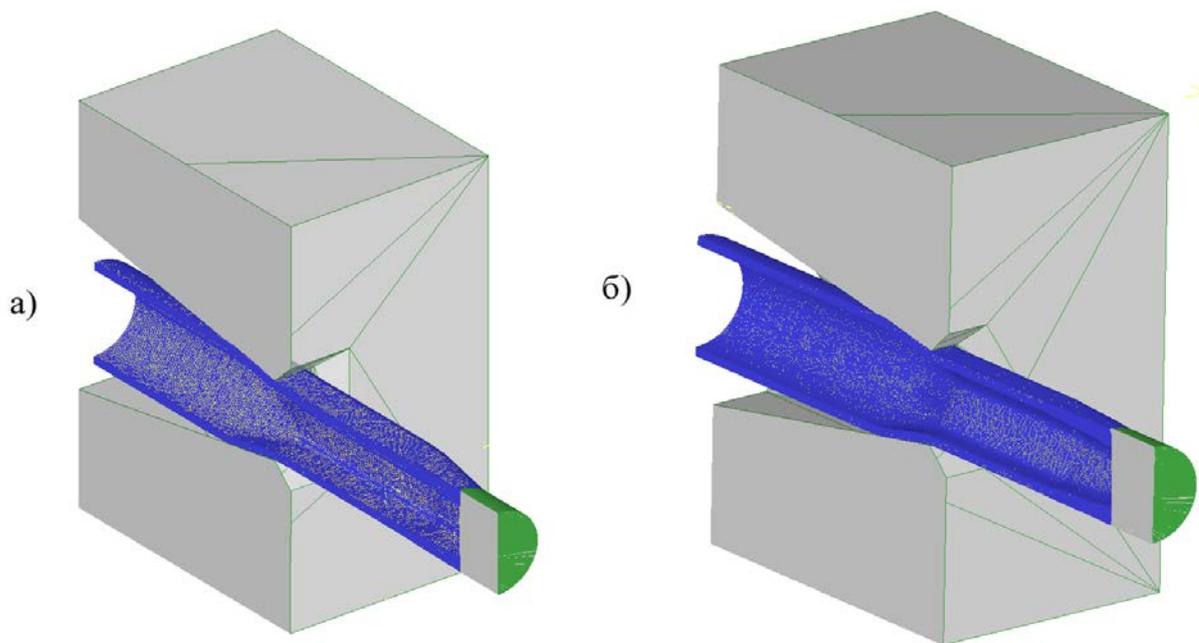


Рисунок 4 – Твердотельная модель очага деформации волоочения с конечно-элементной сеткой разбиения: а – квадратной трубы; б – шестигранной трубы.

Уменьшение размеров элемента разбивки позволяет более точно описать форму инструмента и геометрию получаемых труб, что важно для решения поставленных выше задач. Однако, такое уменьшение приводит к увеличению общего числа элементов и, как следствие, времени расчета.

Разработана методика выбора размера элемента разбивки и оценка его влияния на точность результатов расчета и затрат времени счета. Данную методику также можно использовать при моделировании в исследованиях других процессов обработки металлов давлением. На рисунке 5 представлены зависимости времени счета и отклонений размеров от количества элементов разбиения.

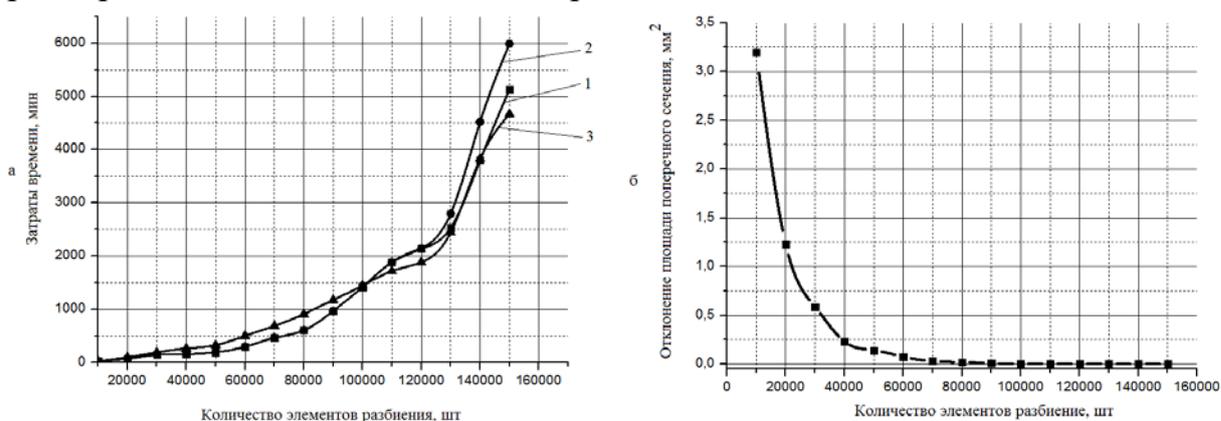


Рисунок 5 – Графики зависимостей затрат времени счета и отклонений геометрических площади поперечного сечения от количества элементов разбиения:
 а – зависимость затрат времени расчета задачи от количества элементов разбиения для трех типов волок; 1 – волокна 1 типа; 2 – волокна 2 типа; 3 – волокна 3 типа.
 б – зависимость отклонения замеров площади поперечного сечения обработанной трубы от количества элементов разбиения.

На этой основе выбран такой размер элемента при котором обеспечивается достаточная точность и приемлемое время расчета при заданных вычислительных мощностях.

В третьем разделе Выполнен анализ влияния факторов, воздействующих на геометрию обработанных труб, энергосиловые показатели процесса и интенсивность деформации.

Следует выделить несколько групп факторов:

- факторы, относящиеся к геометрии и материалу заготовки. Среди них вариации диаметра и толщины стенки, марка материала.
- факторы, относящиеся к форме рабочего инструмента и контактному трению. Рассмотрели различные типы волок с различным углом наклона грани обжимного участка, радиусами сопряжения между калибрующим и обжимным участками, размерами калибрующего участка, варьировали величиной контактного трения. Рассмотрены волокна для производства труб с количеством граней от трех до десяти.
- факторы, относящиеся к технологическим параметрам процесса. Среди которых возможные режимы обработки и способы приложения нагрузки к трубе. Выполнен анализ безоправочного и оправочного волочения.

Рассмотрели три типа конфигураций волок, получивших наибольшее распространение в практики трубного производства. После проведенного анализа влияния форм рабочего инструмента на показатели связанные с точностью формообразования, геометрией готового продукта и энергосиловыми характеристиками процесса, выбрали наиболее рациональный тип формы волочильного канала, в зависимости от целей производства.

Установили закономерности влияния воздействующих факторов на результат формоизменения труб, энергосиловые параметры процесса и интенсивность деформации.

При изучении формоизменения труб рассмотрены: H – толщина стенки в центре грани; L – наружный прогиб граней; R – радиус сопряжения граней по наружной поверхности трубы; r – радиус сопряжения граней по внутренней поверхности трубы; S_a – площадь поперечного сечения после обработки; μ – вытяжка. На рисунке 6 изображены изучаемые геометрические параметры.

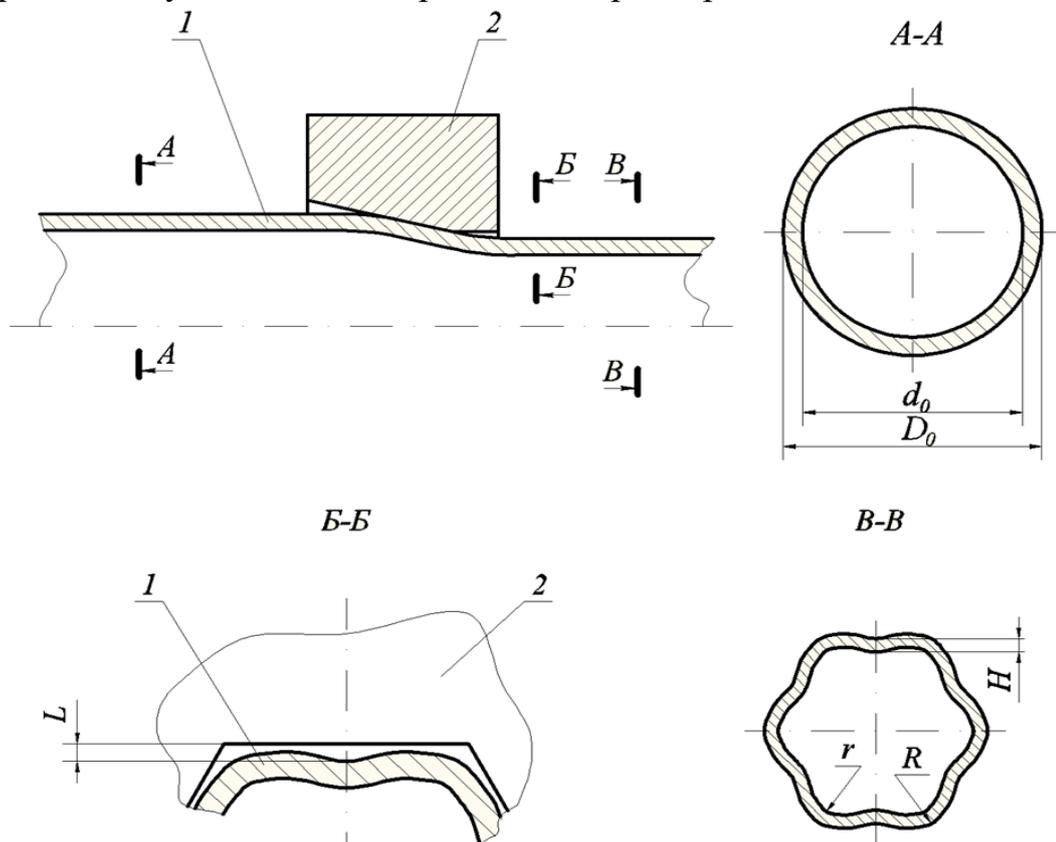


Рисунок 6 – Схема процесса профилирования трубы: 1 – обрабатываемая труба; 2 – волочильная фильера. D_0 , d_0 – наружный и внутренний диаметры заготовки; L – наружный прогиб грани трубы; H – толщина стенки грани; R – радиус сопряжения граней по наружной поверхности трубы; r – радиус сопряжения граней по внутренней поверхности трубы.

Среди энергосиловых показателей процесса рассмотрены: P – усилие волочения; W – работа усилия волочения; E – удельная энергоёмкость процесса волочения.

Численное значение величины удельной энергоемкости определяли в виде

$$E = \frac{W}{q}, \quad (7)$$

где q – масса смещаемого материала, кг.

Работа усилия волочения определена как

$$W = P \cdot l \cdot \mu, \quad (8)$$

где l – единица перемещения при установившемся процессе.

Масса смещаемого материала определена

$$q = (S_0 - S_a) \cdot l \cdot \mu \cdot \rho, \quad (9)$$

где ρ – плотность обрабатываемого материала.

В соответствии с поставленными выше задачами провели параметрический анализ и построили соответствующие графические зависимости. Ниже такой анализ приведен на примере трех параметров: L – прогиб грани, R – радиус сопряжения граней по наружной поверхности и E – удельная энергоемкость процесса обработки.

Влияние геометрии заготовки на формоизменение трубы при профилировании (L и R) и на удельную энергоемкость процесса обработки (E) показаны на примере изменения толщины стенки и наружного диаметра заготовки на рисунке 7.

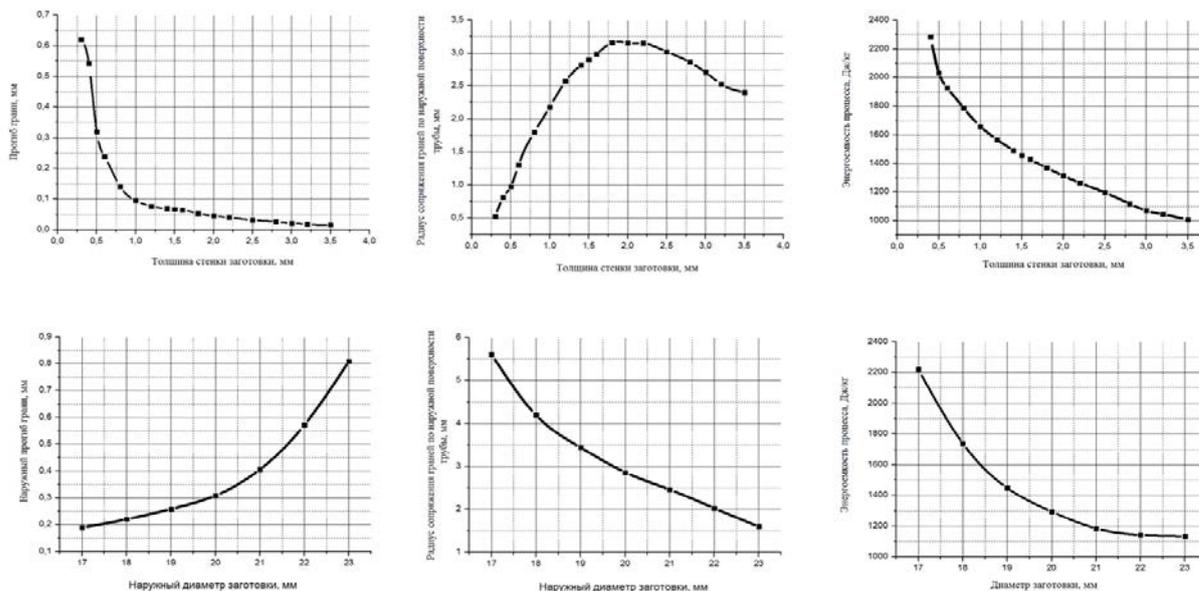


Рисунок 7 – Графики зависимостей прогиба грани, радиуса скругления обработанной трубы и энергоёмкости процесса от толщины стенки и наружного диаметра заготовки

Найдено, что с ростом толщины стенки при постоянном наружном диаметре прогиб грани готовой трубы снижается, радиус сопряжения граней растёт до определенной величины, а удельная энергоемкость снижается. С ростом наружного диаметра прогиб грани растёт, радиус сопряжения граней по наружной поверхности и удельная энергоемкость процесса снижаются. Вариации размеров тонкостенных трубных заготовок

на точность размеров обработанных труб влияет в большей степени, но удельные энергозатраты на их обработку ниже.

Влияние параметров конфигурации рабочего инструмента на формоизменение трубы при профилировании (L и R) и на удельную энергоёмкость процесса обработки (E) показан на примере изменения угла наклона обжимного участка волокна к ее оси и радиуса сопряжения между калибрующим и обжимным участками волокна (рисунок 8).

Найдено, что при увеличении угла наклона обжимного участка волокна прогиб грани L увеличивается, но значение радиуса сопряжения граней по наружной поверхности убывает. Увеличение значения радиуса сопряжения между участками волокна с одной стороны ведет к уменьшению значения прогиба грани, но с другой, увеличивает радиус сопряжения граней по наружной поверхности. С увеличением радиуса скругления удельная энергоёмкость процесса возрастает.

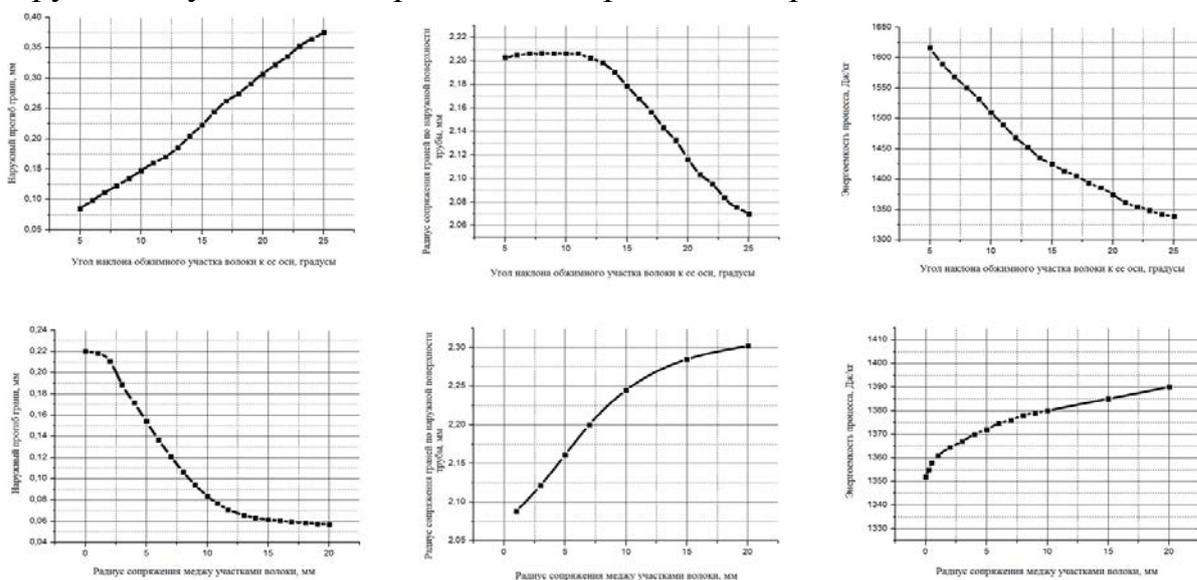


Рисунок 8 – Графики зависимостей прогиба грани, радиуса скругления обработанной трубы и энергоёмкости процесса профилирования от угла наклона обжимного участка и радиуса сопряжения между участками волокна

Влияние технологических параметров процесса профилирования на формоизменение трубы (L и R) и на удельную энергоёмкость процесса обработки (E) показано на примере варьирования значением контактного трения в очаге деформации и приложения дополнительного усилия к трубе при различных режимов обработки представлен (Рис. 9).

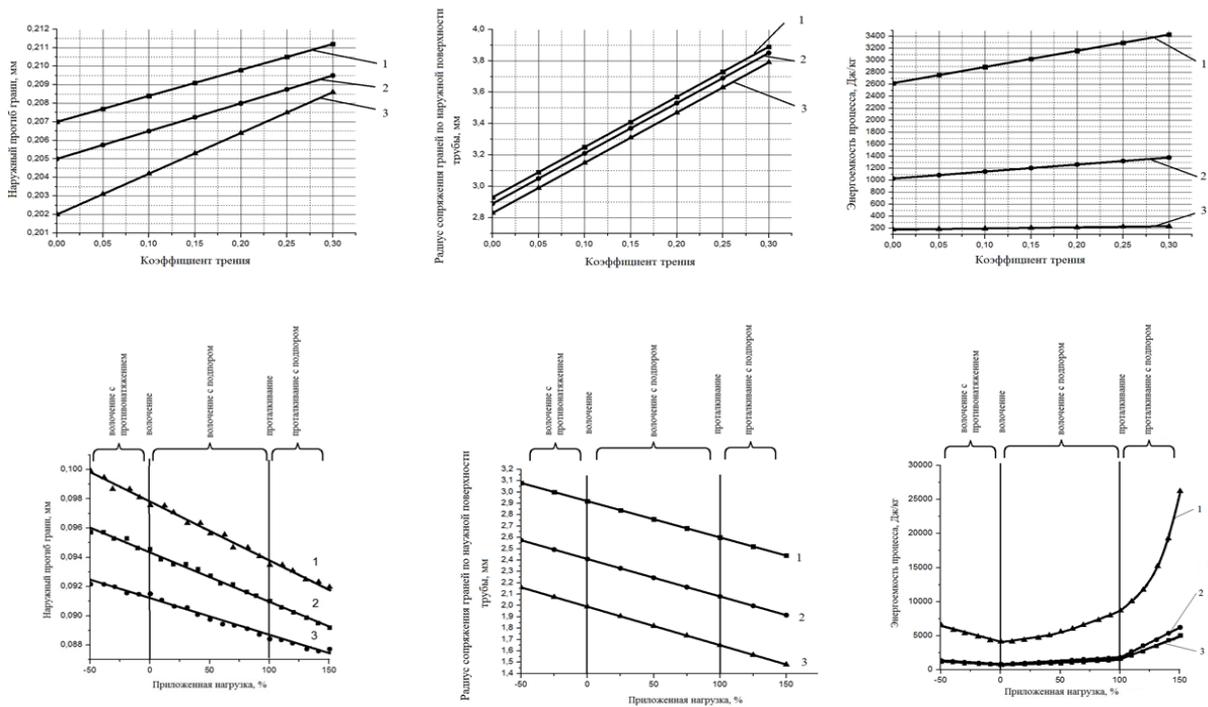


Рисунок 9 – Графики зависимостей прогиба грани, радиуса скругления обработанной трубы и энергоёмкости процесса профилирования от контактного трения в зоне очага деформации и различных режимов обработки и способов приложения дополнительной нагрузки к трубе: 1 – сталь 12X18H10T; 2 – латунь Л63; 3 – медь М2.

Изучено влияние материалов с различными механическими свойствами: медь М2, латунь Л63 и сталь 12X18H10T.

Точность размеров сечения обработанных труб увеличивается со снижением величины контактного трения в очаге деформации. Удельная энергоёмкость процесса также снижается. Большая точность размеров достигается при использовании проталкивания и проталкивания с подпором. Однако при реализации указанных режимов обработки достигается повышенные значения удельной энергоёмкости процесса. Некоторые из найденных зависимостей могут быть аппроксимированы линейной функцией, вида

$$y=a+b \cdot x, \quad (10)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимации.

Распределение интенсивности деформации в поперечном сечении определяет неоднородность механических свойств труб, поставка которых выполняется без термообработки. В результате проведенного исследования построены эпюры распределения значений интенсивности деформации по сечению на наружной и внутренней поверхностях обработанной трубы. Характерная эпюра представлена на рисунке 10.

Проведён сравнительный анализ процессов оправочного и безоправочного волочения. Оправочное волочение позволяет повысить точность размеров труб, но как показало исследование, при использовании оправки энергосиловые показатели процесса и значения интенсивности деформации выше, чем при безоправочном процессе.

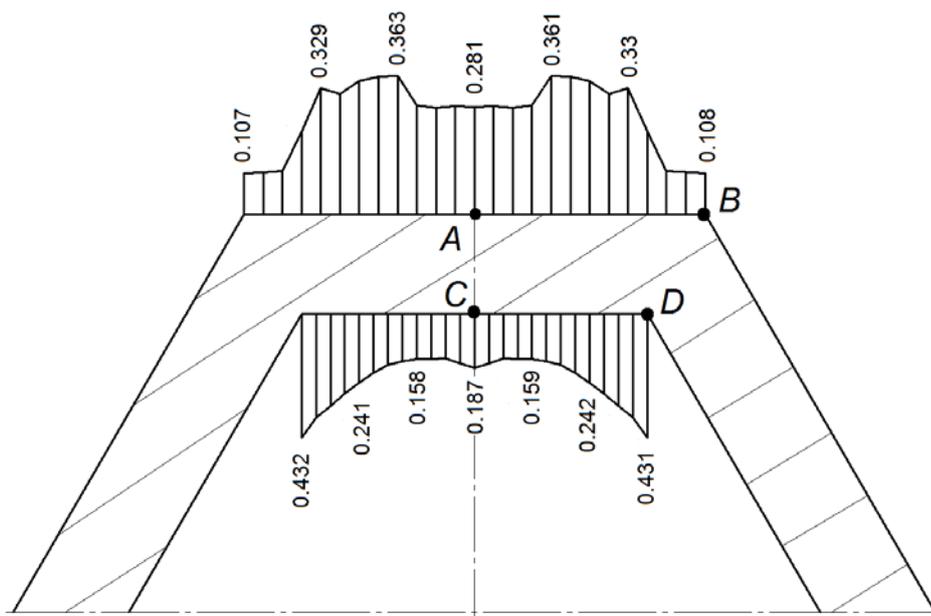


Рисунок 10 – Распределение интенсивности деформации в поперечном сечении трубы

В таблице 1 приведены результаты, полученные при моделировании процесса волочения трубы квадратного сечения из круглой заготовки с наружным диаметром 20мм, толщиной стенки 1,5мм из стали 10.

Таблица 1 – Результаты исследования оправочного и безоправочного волочения

№ п/п	Наименование параметра	Волочение		
		Оправочное	Безопрочно	
1	Толщина стенки H , мм	1,53	1,58	
2	Прогиб грани L , мм	0,02	0,3	
3	Площадь поперечного сечения S_a , мм ²	77,02	76,31	
4	Вытяжка μ	1,13	1,14	
5	Наружный радиус сопряжения R , мм	0,85	2,62	
6	Внутренний радиус сопряжения r , мм	0,65	0,99	
7	Усилие волочения P , кН	14,12	9,8	
8	Работа усилия волочения W , кДж	137,2	127,7	
9	Энергоемкость процесса E , кДж/кг	1,75	1,31	
10	Интенсивность деформации	Точка A	0,477	0,443
		Точка B	0,225	0,221
		Точка C	0,333	0,319
		Точка D	0,679	0,650

Так например, в ГОСТ Р 54157-2010 на квадратные стальные трубы, указаны следующие требования к точности: прогиб грани не более 0,5мм; радиус сопряжения не более $2S$ (двух толщин стенки заготовки); отклонение толщины стенки после обработки не более $\pm 12,5\%$ от номинальной.

Оправочное волочение, кроме известных достоинств, имеет ряд недостатков: необходимость изготовления профильной оправки и последующего ее извлечения из обработанной трубы, что ухудшает качество поверхности и точность размеров сечения, а также высокую стоимость изготовления оправки, ограничения длины профилируемых труб, необходимость химической обработки поверхности труб и нанесение смазки на внутреннюю поверхность.

Кроме того, существует потребность в профильных трубах, форма которых исключает возможность использования оправки при их изготовлении. Для производства подобных труб необходимо прибегать к безоправочному процессу обработки и профилировать трубы путем подбора значений определяющих факторов.

Влияющие факторы в зависимости от возможности регулирования значений при обработке, можно разделить на две группы:

а) Такие, значения которых в процессе обработки не подвергаются изменению. Среди них: форма рабочего инструмента и размеры заготовки.

б) Факторы, значения которых в процессе обработки возможно изменить. К таковым относятся: контактное трение в зоне очага деформации; значение дополнительных нагрузок приложенных к трубе, которые, например, используются, при реализации процесса волочения с противонапряжением.

Как показало исследование, возможно подобрать значения влияющих факторов при реализации процесса безоправочного волочения, таким образом, что отклонения размеров обработанных труб будут находиться в пределах допусков, указанных в соответствующих ГОСТах. Таким образом, возможно выбирать и регулировать значения влияющих факторов для получения труб заданной геометрии, причем с высокой точностью их размеров.

По результатам третьего раздела выявлены закономерности, по которым влияющие факторы оказывают воздействие на результат и процесс обработки. Установлено, что меняя параметры процесса в диапазоне варьируемых величин, можно регулировать форму получаемой продукции. На основании полученных результатов можно выбрать оборудование, рабочий инструмент и технологию обработки позволяющую придать получаемой продукции заданную геометрию, требуемую точность и снизить энергоемкость процесса производства.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментов. Целью проведения натурного эксперимента является подтверждение адекватности разработанных моделей процесса профилирования. Профилирование труб и определение фактической формы рабочего инструмента проведено на

базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», размеры полученных труб и микроструктура металла определены на базе ОАО «УПП «Вектор».

В рамках проведенного эксперимента был исследован рабочий инструмент для профилирования шестигранной и квадратной трубы, имеющий различную форму волоочильного канала. Волока для производства шестигранной трубы имела волоочильный канал в виде усеченной пирамиды с плоскими гранями. Для производства квадратных труб использовали волоку, имевшую волоочильный канал с обжимным участком в виде усеченного конуса, сопряженный с калибрующим участком. Изучен процесс профилирования труб с различной толщиной стенки. В качестве материала труб были выбраны сталь 10 и латунь Л63.

Профилирование труб проводилось на разрывной машине МИ-40У, для которой была изготовлена оснастка, позволяющая воспроизвести процесс волочения. Данная аппаратура позволяет испытывать образцы из различных материалов при их растяжении и сжатие усилием до 40 кН. Используется нагружающее устройство, блок управления и программно-методическое обеспечение машины. Блок управления осуществляет подачу сигналов измерительных каналов на стандартный интерфейс RS-232 для подключения ПЭВМ.

Измеряли геометрические параметры труб после обработки, энергосиловые параметры процесса профилирования и изучали микроструктуру изделия с целью определения интенсивности деформации. Среди геометрических параметров готовой трубы были измерены: прогиб и толщина стенки в центре грани, радиусы сопряжения поверхностей граней по наружной и внутренней поверхностям, площадь поперечного сечения, усилие волочения.

Для того, чтобы использованная конечно-элементная модель адекватно соответствовала реальному процессу, была создана фактическая модель рабочего инструмента, полученная на специализированном оборудовании, позволяющем создавать трехмерную геометрическую модель детали любой конфигурации путем сканирования ее формы. Сканирование поверхности волокни проводилось на координатной измерительной машине Power SHAPE 7080 фирмы Global performance. Указанное оборудование позволяет передавать облако точек, полученное в результате замеров формы объекта, в пакеты прикладных программ для трехмерного моделирования. При помощи данного оборудования определили фактическую форму волоочильного канала волокни с учетом его износа и таким образом конечно-элементные расчеты были наиболее приближены к натурному эксперименту.

Кроме того, данное оборудование было также использовано для определения фактических размеров у изделия после обработки, сопоставления их с ожидаемыми результатами и оценки отклонений размеров с высокой точностью.

Натурный эксперимент был проведен на трех группах образцов. В каждой группе образцов было отобрано по три идентичных трубных заготовок, для снижения статистической ошибки обработки результатов путем проведения параллельных экспериментов. Для того, чтобы механические свойства, геометрические параметры и прочие параметры образцов были идентичны, их вырезали из одной заготовки.

Для определения размеров обработанных труб, энергосиловых показателей процесса профилирования, деформированного состояния, а также статистической обработке результатов натурального эксперимента, потребовалось прибегнуть к различным методикам.

Для исследования деформированного состояния воспользовались методикой Смирнова-Аляева Г.А. Определение деформированного состояния производится на основании изучения структурного анализа по микрошлифам материала, при этом сравниваются микроструктуры до деформации и после обработки.

Результаты проведенного натурального эксперимента показали хорошую сходимость значений по геометрическим, энергосиловым и деформационным параметрам с результатами теоретического эксперимента, что подтверждает проведенный математический эксперимент.

На основании полученных результатов даны рекомендации по выбору формы рабочего инструмента, параметров заготовки и по ведению технологии процесса профилирования профильных труб с требуемой формой, качеством и точностью, а также, по снижению энергозатрат. Предложен тип рабочего инструмента, позволяющий проводить обработку с высокой точностью и энергоэффективностью.

Даны рекомендации по выбору специализированных станков в зависимости от длины обрабатываемых труб. Рекомендованные станы позволяют реализовывать режимы обработки, необходимые для получения труб требуемой формы и качества. Выполнен расчет элементов конструкций рекомендованных специализированных станков. Определена рациональная форма плашек, установлена их длина и угол профиля захватов при проталкивании и применении специальных станков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны адекватные модели очага деформации процесса безправочного волочения профильных труб. Данные модели соответствует реальному процессу, а принятые допущения не оказывают значимого влияния на результаты расчетов.

2. Выполнена оценка влияния размеров элементов разбивки очага деформации на точность решения. Выбрано рациональное соотношение между затратами времени на проведение расчета, размерами элементов разбивки и отклонениями размеров формы обработанных труб. В разработанной методике оценки влияния размеров элементов разбивки на

точность результата расчета дана полная картина учета влияющих факторов (например, таких как, окна плотности элементов и количество элементов и узлов разбивки по высоте поперечного сечения заготовки).

3. Модели, описывающие очаг деформации, учитывают упругие и пластические деформации. Решена упруго-пластическая задача, поскольку упругое последствие трубы после снятия обрабатывающей нагрузки оказывает существенное влияние на результат обработки и влияет на точность размеров готовых труб.

4. При проектировании процессов профилирования труб необходимо учитывать энергетические затраты на реализацию процесса. Критерием оценки энергоэффективности процессов выступает использованный показатель – удельная энергоемкость. С его помощью можно выполнять сравнения различных вариантов, производить выбор наименее затратного способа производства.

5. Установлено, что распределение интенсивности деформации по сечению трубы характеризуется значительной неравномерностью, при этом отношение максимального значения к минимальному в некоторых случаях может достигать значения свыше трех. Это приводит к необходимости термообработки профилированных труб.

6. Проведен анализ влияния формы рабочего инструмента на результат обработки и процесс профилирования. В итоге был выбран такой тип волокна при использовании которого возможно получение труб с повышенной точностью при низких значениях удельной энергоемкости.

7. Проведен анализ и установлены зависимости влияния технологических параметров процесса волочения на результат обработки и процесс профилирования, среди которых были исследованы: контактное трение, материал заготовки, приложение дополнительных усилий к трубе в процессе обработки – волочение с противонатяжением, проталкивание с подпором, проталкивание с натяжением. На основании полученных результатов были даны рекомендации по ведению процесса производства и выбору технологических параметров, позволяющие производить трубы с высокой точностью и при низких энергозатратах.

8. Установлено, что на точность размеров изделия оказывают влияние вариации размеров заготовки. Для получения продукции более высокого качества, необходимо дополнительно производить предварительную сортировку заготовок.

9. Проведена проверка результатов теоретического исследования путем сравнения с результатами натурального эксперимента по энергосиловым, деформационным и геометрическим показателям, для различных форм труб и материалов. Результаты теоретической и практической разделов диссертации хорошо согласуются, что подтверждает адекватность построенной модели и выбранного метода теоретического исследования.

10. Даны рекомендации по выбору оборудования, параметров стана и проведен расчет элементов конструкции предложенной машины.

Использование рекомендаций позволяет производить профильные трубы с высокой точностью размеров при снижении показателей энергозатрат на их производство.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Окулов, Р.А. Энергоемкость обработки заклепочной проволоки из дюралюминия волочением и радиальным обжатием / Р.А. Окулов, В.С. Паршин, А.П. Карамышев // Вестник машиностроения. – 2012. – №9. – С. 80-81. (0,3/0,2 п.л.)

2. Окулов, Р.А. Значение использования противонапряжения в процессе волочения профильных труб / Р.А. Окулов, С.В. Паршин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – №4. – С. 40-44. (0,5/0,4 п.л.)

3. Окулов, Р.А. Эффективность использования дополнительного усилия при волочении профильных труб / Р.А. Окулов, С.В. Паршин, В.А. Спиридонов // Вестник машиностроения. – 2014. – №5. – С. 82-84. (0,3/0,2 п.л.)

4. Окулов, Р.А. Влияние контактного трения на геометрические и энергосиловые параметры при волочении профильных труб / Р.А. Окулов, С.В. Паршин, В.А. Спиридонов // Производство проката. – 2014. – №6. – С. 4-7. (0,6/0,5 п.л.)

5. Окулов, Р.А. Сравнительный анализ применения волок различных типов при профилировании труб / Р.А. Окулов, С.В. Паршин // Metallurg. – 2015. – №2. – С. 55-57. (0,4/0,3 п.л.)

Прочие публикации:

6. Окулов, Р.А. Сравнительный анализ точности теоретических исследований профилирования труб при использовании твердотельных моделей очага деформации / Р.А. Окулов, С.В. Паршин, В.А. Спиридонов, Д.И. Цветков // Инженерная мысль машиностроения будущего: материалы I международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – С. 105-107. (0,2/0,1 п.л.)

7. Окулов, Р.А. Обоснование выбора размера элемента разбивки при решении задач методом конечных элементов на примере волочения профильных труб / Р.А. Окулов, С.В. Паршин, В.А. Спиридонов, Д.И. Цветков // Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2013: материалы I международной научно-технической конференции. – Череповец: ЧГУ. – 2013. – С. 123-126. (0,3/0,2 п.л.)

8. Окулов, Р.А. Определение степени влияния угла наклона обжимного участка рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса волочения профильных труб и на геометрию получаемой продукции / Р.А. Окулов, С.В. Паршин // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2013. – №1. – С. 20-25. (0,4/0,3 п.л.)

9. Окулов, Р.А. Изучение роли отклонения толщины стенки заготовки в процессе волочения профильных труб и его влияние на

качество продукции / Р.А. Окулов, С.В. Паршин, В.А. Спиридонов // Качество в обработке материалов. – 2013. – №1. – С. 26-28. (0,3/0,2 п.л.)

10. Окулов, Р.А. Изучение влияния диаметра заготовки на точность размеров сечения профильных труб и процесс обработки / Р.А. Окулов, С.В. Паршин // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы VII международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ. – 2013. – С. 165-168. (0,3/0,2 п.л.)

11. Окулов, Р.А. Исследование влияния геометрии рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса волочения профильных труб и на качество продукции / Р.А. Окулов, С.В. Паршин, В.А. Спиридонов, А.О. Красных, П.А. Антонов // Инженерная мысль машиностроения будущего: материалы II международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ. – 2013. – С. 77-80. (0,2/0,1 п.л.)

12. Окулов, Р.А. Анализ влияния изменения размера калибрующего участка волокна на геометрию профильных труб и на процесс производства / Р.А. Окулов, С.В. Паршин, В.А. Спиридонов, А.О. Красных, П.А. Антонов // Инженерная мысль машиностроения будущего: материалы II международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ. – 2013. – С. 112-115. (0,2/0,1 п.л.)

13. Окулов, Р.А. Значение применения проталкивания через волоку при профилировании труб / Р.А. Окулов, С.В. Паршин // Материалы VII международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург: УрФУ. – 2013. – С. 115-117. (0,4/0,3 п.л.)

14. Окулов, Р.А. Определение степени влияния материала заготовки на энергосиловые параметры процесса волочения профильных труб и на геометрию получаемой продукции / Р.А. Окулов, С.В. Паршин // Материалы VII международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург: УрФУ. – 2013. – С. 202-204. (0,4/0,3 п.л.)

Подписано в печать 06.1015. Формат 60*84 1/16
Бумага 80 г/м3. Цифровая печать.
Тираж 100 экз. Заказ №45
Отпечатано в учебной лаборатории
Полиграфических машин кафедры «Детали машин»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-120