На правах рукописи

Паршина Анастасия Анатольевна

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Раскатов Евгений Юрьевич

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 ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, профессор кафедры «Механика».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 17 мая 2018 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «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 ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»,
http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=277007

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Раскатов Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Металлоизделия, обеспечивающие лучшее соотношение экономического эффекта от их применения к стоимости производства и эксплуатации, отвечают современным требованиям энерго- и ресурсосбережения. К числу подобных изделий относятся профильные трубы, имеющие некруглое поперечное сечение и обладающие пониженной металлоемкостью, рациональной формой, изготовленные из материалов, отвечающих требованиям их эксплуатации. Применение таких труб в отраслях общего машиностроения, металлургии, атомном машиностроении, теплоэнергетике, строительстве и других обеспечивает получение значительного технического и экономического эффекта.

Из всего многообразия профильных труб в работе рассмотрены такие, которые имеют переменную по сечению толщину стенки, а само сечение содержит внутри или снаружи правильный многоугольник или сложную, криволинейную форму. Они могут быть получены путем одно- или многопроходного оправочного волочения в профильной волоке или на профильной оправке. В связи с отмеченными условиями этого процесса возникают следующие основные его особенности: сложный характер течения металла с утонением или утолщением элементов поперечного сечения профиля. Возникающее при таком процессе повышенное сопротивление течению в направлении ребер многоугольного профиля, либо по выступам криволинейного профиля, значительное давление на волочильный инструмент и рост сил трения приводит к увеличению усилия волочения.

Проведенный обзор показал, что имеющиеся в настоящее время теоретические и экспериментальные исследования касаются производства точных сплошных профилей. Имеются лишь отдельные разработки, посвященные определению размеров заготовки для производства многогранных труб переменного поперечного сечения. Калибровка рабочего инструмента производится на основе простых геометрических соотношений, содержащих лишь размеры заготовки и готовой трубы и не учитывающих особенности течения металла.

Задачи разработки системы автоматизированного расчета параметров труб по переходам волочения, в том числе и для изготовления труб с криволинейным профилем, определения течения металла при волочении в профильном инструменте, построения рациональной формы его рабочего канала, определения давления на инструмент, формоизменения при профилировании, напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла практически не исследованы. Отсутствует методика определения усилия волочения рассматриваемых труб.

Степень разработанности темы исследования

Процесс получения профильных труб путем деформации гладкой трубной заготовки известен достаточно давно, и рассматривался в работах В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, В.И. Соколовского, И.Л. Перлина, М.З. Ерманка. Из рассмотренных работ, посвященных изучению процессов

волочения профильных труб следует отметить работы С. В. Паршина, Н. В. Семеновой, Р. А. Окулова, Е. В. Шоковой. Эти работы касаются исследования формоизменения и напряженно – деформированного состояния профильных труб, которые могут быть получены волочением без оправки путем изгиба стенки. А. И. Дорохов занимался изучением процесса изготовления профильных труб с переменной толщиной стенки и предложил метод определения размеров заготовки, а В. Н. Данченко, В. В. Сергеев, Э. В. Никулин разработали методику определения параметров технологического инструмента для труб, имеющих поперечное сечение в виде правильных многоугольников.

Следует отметить, что получение труб с переменной толщиной стенки в значительной мере отличается от такового для труб с постоянной толщиной стенки, в частности, наличием повышенных величин деформации в зонах утонения и утолщения профиля. Процесс недостаточно исследован в аспектах определения параметров напряженно – деформированного состояния, поврежденности металла, точности геометрических размеров готового профиля (а именно влияния на последнюю размеров трубной заготовки). Развитие теории профилирования труб с переменной толщиной стенки характеризуется переходом от определения отдельных параметров процесса к созданию расчетной и исследовательской модели процесса, позволяющей определить комплекс параметров процесса, инструмента, заготовки, а также свойства готовой трубы.

Цель работы – исследование и совершенствование процесса и рабочего инструмента для оправочного волочения труб с переменной по периметру толщиной стенки, выдача рекомендаций по рациональному ведению технологии и применению необходимых машин.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработать геометрические и конечно-элементные модели очага деформации при волочении профильных ТПТС на профильной оправке или в профильной волоке, в том числе и при многопереходных процессах. Разработать с использованием этих моделей метод определения калибровки профильных волок и оправок.
2. Разработать автоматизированную систему определения размеров заготовки, позволяющую учитывать форму и размеры готовой трубы, выбирать эти размеры с учетом существующих ГОСТов на круглые трубы. Такие расчеты необходимо выполнять как для ТПТС, имеющих в составе поперечного сечения правильные многоугольники, так и имеющие криволинейный профиль.
3. Провести исследования, включающие определение напряженно-деформированного состояния материала трубы в очаге деформации, поврежденность металла и энергосиловые параметры процесса. Определить влияние параметров процесса волочения и конфигурации готовой трубы на заполнение углов сечения.

4. Провести экспериментальное исследование, в частности оценку адекватности процесса профилирования труб на основе исследования микроструктуры исходных протянутых труб и определения деформированного состояния, разработать рекомендации по совершенствованию процессов профилирования ТПТС и выбору параметров инструмента и оборудования.

Научная новизна работы заключается в разработке комплексной модели процессов оправочного волочения профильных труб с переменной толщиной стенки, включающей создание геометрической и конечно-элементной моделей, учитывающих упрочения металла и контактное трение, которые позволили находить: форму и размеры заготовки на промежуточных переходах и калибровку рабочего инструмента, новые зависимости для энергосиловых параметров процесса, напряженно – деформированного состояния, контактного давления металла на инструмент и поврежденности металла в очаге деформации, предложить на этой основе рекомендации по совершенствованию процессов деформации и выбору оборудования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Создана комплексная модель процессов оправочного волочения профильных труб, имеющих переменную по сечению толщину стенки, и на этой основе найдены новые зависимости энергосиловых параметров процесса и локальных характеристик напряженно – деформированного состояния металла в очаге деформации.
2. Разработана автоматизированная система, позволяющая при заданных размерах готовых труб определять необходимые параметры трубной заготовки на промежуточных переходах
3. Разработаны рекомендации по ведению технологического процесса профилирования, использование которых позволяет получать трубы заданной геометрии, а поврежденность металла будет находиться в допустимых пределах.
4. Разработаны предложения по построению рационального профиля рабочего инструмента, совершенствованию технологии и выбору состава оборудования, позволяющих повысить эффективность их использования.

Методология и методы диссертационного исследования

Для достижения поставленной цели было использовано сочетание теоретических, вычислительных и экспериментальных методов исследования. Экспериментальное исследование процесса профилирования проводили на испытательной машине ИР5113-100 в лаборатории УрИ ГПС МЧС РФ, измерение размеров профильных труб и волок в УрФУ им. Б.Н. Ельцина (координатно-измерительная машина Global Performance), изучение микрошлифов труб в лаборатории ИМаш УрО РАН.

Построение калибровки рабочего инструмента и расчет параметров заготовки на промежуточных переходах волочения основаны на применении принципа наименьшего действия и реализовано на основе компьютерной геометрии. Комплексная модель процесса, содержащая геометрические и

математические модели реализована в лицензионной версии программы ANSYS, основанной на методе конечных элементов. Построение геометрических моделей очага деформации осуществлялось в лицензионной CAD системе трехмерного твердотельного моделирования Компас 3D. Математическая модель процесса основана на полной системе уравнений теории пластичности, а определение энергосиловых параметров процесса волочения проведено на основе основополагающего принципа теории пластичности – баланса мощностей в очаге деформации.

Обработка и анализ экспериментальных данных проводилась с помощью методов математической статистики. Результаты теоретических исследований согласуются с данными экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Постановка задач теоретического и экспериментального исследований, позволяющих определить конфигурацию рабочего канала волок и профиль оправок, в том числе при многопереходных процессах, энергосиловые параметры, распределение показателей напряженно-деформированного состояния и поврежденность металла, а также пути совершенствования процесса профилирования.
2. Методика построения комплексной модели очага деформации, учитывающая особенности геометрии, силовых условий и течения металла в процессе профилирования при соблюдении условия безобрывности труб и создания на этом основании необходимой конфигурации профильных волок и оправок.
3. Разработка автоматизированной системы расчета необходимых параметров заготовки на промежуточных переходах при заданных размерах готовых труб с учетом ограничений на допустимую степень деформации и позволяющую рассчитывать, как одно-, так и многопереходные процессы волочения.
4. Методика оперативного построения линий тока металла и эквипотенциалей для одно- и многопереходного волочения профильных труб, позволяющую находить калибровку рабочего инструмента.
5. Результаты теоретических исследований влияния параметров процесса на формоизменение металла в очаге деформации, контактное давление на инструмент, напряженно-деформированное состояние и поврежденность металла.
6. Результаты экспериментальных исследований профилирования труб с переменной толщиной стенки, включающие натурное моделирование с целью оценки адекватности принятых теоретических моделей и определения микроструктуры образцов для установления интенсивности деформации.
7. Создание рекомендаций по совершенствованию процесса изготовления профильных труб и определению конфигурации рабочего инструмента при одно- и многопроходном волочении, а также выбору оборудования, позволяющего повысить эффективность процесса.

Степень достоверности результатов, полученных в работе, подтверждается применением современных методов исследования и большим объемом экспериментального материала, обработанного с использованием методов математической статистики. Положения и выводы по работе не противоречат известным научным представлениям и результатам.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2013), II Международной заочной научно-практической конференции «Автоматизированное проектирование в машиностроении» (Новокузнецк, 2014), Международной научно-практической конференции «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» (Екатеринбург, 2015), IV Международной молодежной научной конференции «ФТИ-2017», (Екатеринбург, 2017), XI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) AS'2017 «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2017).

Публикации. По теме работы опубликовано 11 работ, в том числе 3 работы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, 1 приложения. Работа изложена на 162 страницах, содержит 69 рисунков, 8 таблиц. Библиографический список содержит 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и обозначена степень разработанности темы исследования, сформулирована цель и задачи, описана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, методология и методы диссертационного исследования, отмечены положения, выносимые на защиту и степень достоверности полученных результатов.

В первой главе работы рассмотрены существующие способы и устройства для профилирования труб с переменной по периметру толщиной стенки, включающие прессование, горячую и холодную периодическую прокатку, а также волочение. Показано, что для выбранного к рассмотрению сортамента профильных труб (рисунок 1) рациональным является использование волочения на неподвижной или подвижной оправке.

Обзор методов теоретического исследования показал, что в настоящее время имеются работы, касающиеся методов построения калибровки инструмента и расчета течения металла для сплошных фасонных профилей. Полученные при этом результаты, приведенные в работах Г.Я. Гуна, В.Н. Выдрина с сотрудниками, В.В. Зверева, могут быть использованы при разработке калибровки инструмента для производства труб с переменной по периметру толщиной стенки.

Показано, что в настоящее время определение параметров заготовки для производства профильных труб производится на основе зависимостей,

полученных на основе экспериментальных данных, а расчеты последовательности формоизменения выполняются, исходя из геометрических построений инструмента без учета возможного фактического течения металла.

Рассмотрены существующие методы теоретического исследования параметров напряженно – деформированного состояния металла и усилия волочения. На основе проведенного анализа выполнена постановка задач теоретического и экспериментального исследования, совершенствования технологического процесса и рабочего инструмента, выбора необходимых устройств.

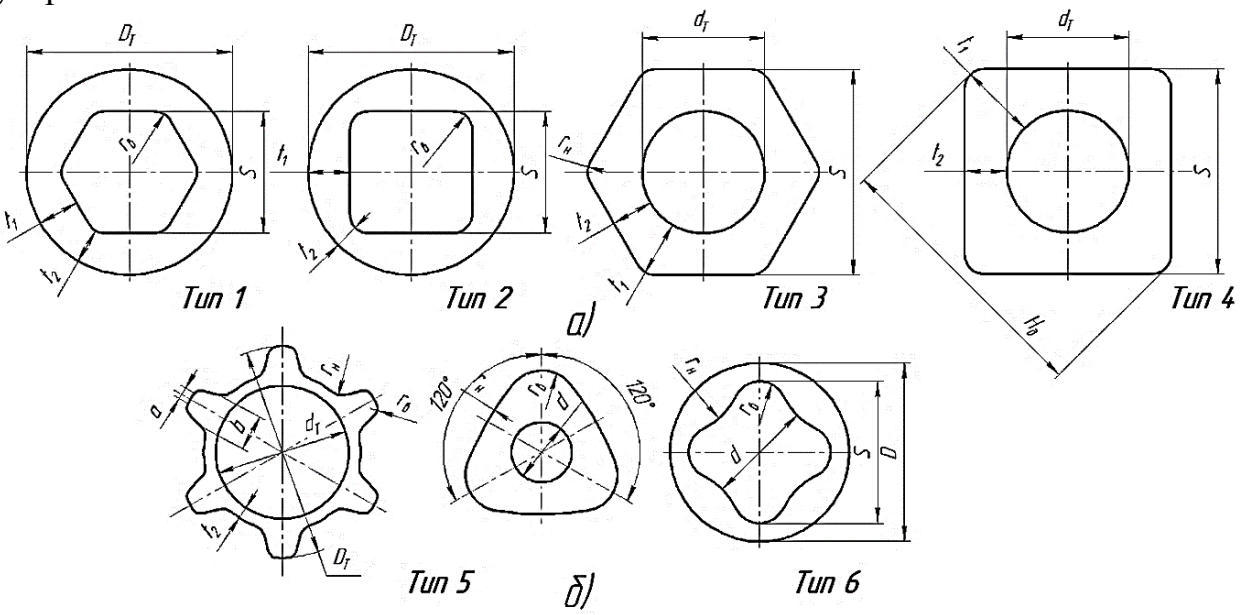

Рисунок 1 – Разновидности профильных ТПТС: а – на основе правильных многогранников, б – криволинейные профили

Во второй главе выполнена разработка комплексной модели процесса волочения труб с переменной толщиной стенки, включающей геометрические модели очага деформации профильных труб, модель расчета калибровки рабочего инструмента, модель построения течения металла и описания профиля инструмента, а также уравнения механики деформирования металла и определение энергосиловых параметров процесса.

Первый этап решения поставленных задач – это построение геометрических моделей очага деформации. Примеры таких моделей для однопроходного волочения приведены на рисунке 2 для внутреннего и наружного профилирования труб. При двухпроходном волочении заготовка, полученная в первом проходе, например, типа «невыполненный» квадрат с криволинейными гранями, передается на завершение волочения. При изготовлении криволинейных профильных труб число проходов может достигать 3...5. При этом происходит постепенное формирование готового профиля. Число проходов волочения определяется допустимой вытяжкой, зависящей от прочности переднего конца трубы и другими факторами.

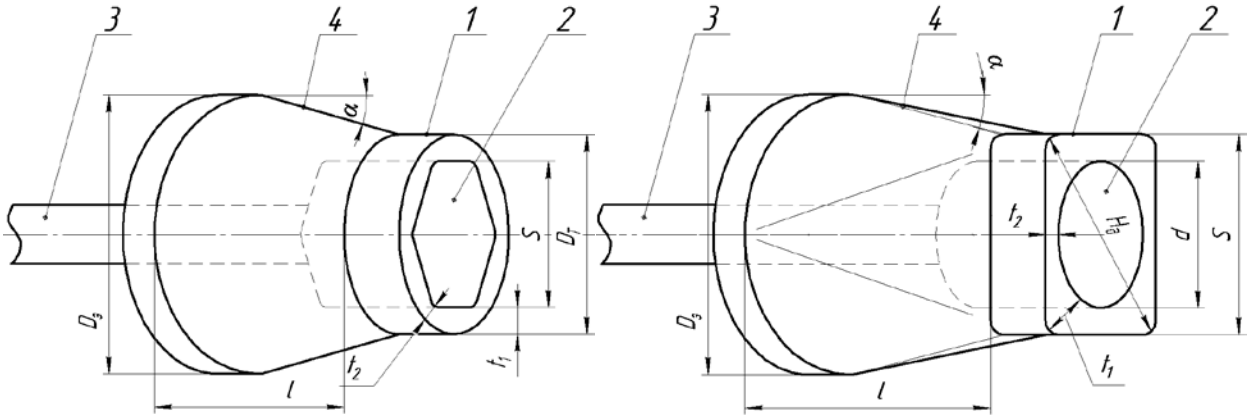

Рисунок 2 – Очаг деформации при профилировании шестигранного и квадратного профилей: 1 – готовая труба; 2 – профильная оправка, 3 – стержень оправки, 4 – рабочий конус

Разработка калибровки инструмента в общем случае должна содержать следующие необходимые этапы: определение размеров и формы заготовки, определение взаимного расположения контуров заготовки и готового профиля, выбор величины вытяжки и ее распределение по переходам, определение размера и формы труб по промежуточным переходам.

Для изготовления ТПТС необходимо использовать круглую трубную заготовку, размеры которой позволяют с наименьшими затратами энергии и материальных ресурсов получить заданный профиль. Задачи, следовательно, заключаются в том, чтобы находить наружный диаметр и толщину стенки заготовки, а также форму и размеры рабочего инструмента на всех необходимых переходах волочения.

Автоматизированная система выбора размеров заготовки ТПТС

Необходимость оперативного определения размеров заготовки и профиля инструмента, которые учитывают фактическое течение металла, многократность уточнения расчетных параметров, создание возможности такого расчета заводскими калибровщиками в случае поступления нового заказа, снижения влияния субъективного фактора, приводят к необходимости создания автоматизированной системы выбора размеров заготовки ТПТС, пригодной как для проектирования профилей простой формы, так и проектирования калибровки профилей сложной криволинейной формы.

Для построения автоматизированной системы используем методы компьютерной геометрии, применение программ которой позволяет строить заданные фигуры, определять их размеры и площадь и др.

Автоматизированная система содержит три модуля. Первый модуль позволяет определить параметры заготовки в общем виде, устанавливает их значение для однопроходного волочения труб с поперечным сечением в виде правильных многоугольников, производит сравнение полученных данных со значениями по ГОСТу. Второй модуль предназначен для определения размеров поперечного сечения заготовки при двухпроходном волочении, находит геометрические параметры промежуточного перехода на основе построения линий тока и эквипотенциалей для труб, содержащих в сечении

правильные многоугольники. Третий модуль предназначен для расчетов необходимого числа переходов криволинейных профилей с определением размеров всех промежуточных переходов.

Полученные размеры заготовки, как правило, отличаются от имеющихся в ГОСТах для круглых труб.

Опыт расчетов с использованием выбора диаметра заготовки и толщины ее стенки по ГОСТ показал, что иногда возникает увеличение суммарной вытяжки для однопроходного волочения больше допустимого. Следовательно, необходим в этом случае один предварительный переход волочения на неподвижной цилиндрической оправке для получения размеров труб, равных первоначально расчетным, либо получение этих размеров непосредственно на трубном заводе.

Далее при необходимости ведем расчет для многопереходного волочения. Путей перехода от размеров и конфигурации заготовки к параметрам готовой трубы может быть весьма много. Действительным будет такой, при котором металл перемещается по линиям тока, ортогональным к исходному и конечному профилям, а контур рабочего инструмента соответствует эквипотенциалям, ортогональным линиям тока. Положение эквипотенциалей на линиях тока определяется необходимым значением вытяжки.

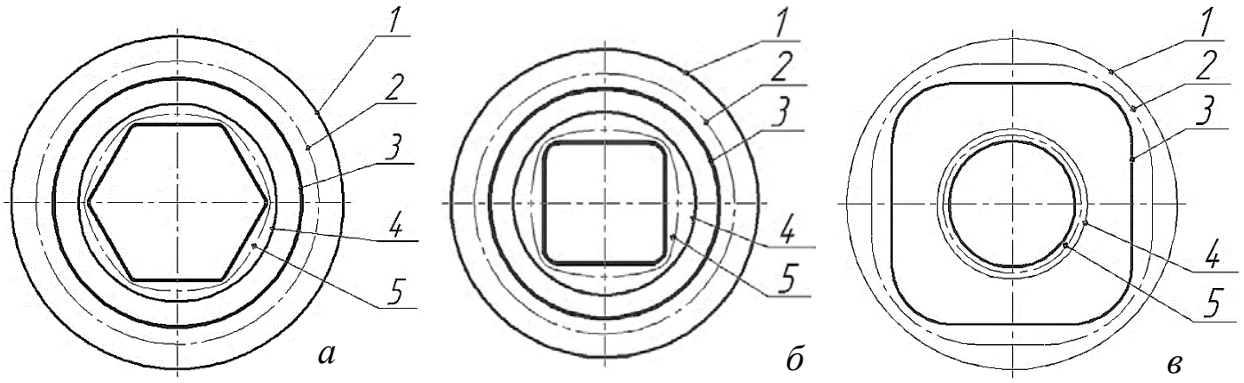

Рисунок 3 – Примеры построения профилей при двухпроходном волочении: а – круг – внутренний шестигранник; б- круг – внутренний квадрат; в – круг – наружный квадрат. 1 и 4 – наружный и внутренний диаметры заготовки; 2 и 5 – наружный и внутренний размеры промежуточного перехода; 3 – наружный контур готового профиля

Для определения конфигурации и размеров промежуточного профиля ТПТС разработан и показан ниже компьютерный способ построения линий тока и эквипотенциалей. На основе предложенной автоматизированной системы выполнены расчеты, некоторые результаты приведены для двухпроходного волочения. Пример определения параметров заготовки для многопереходного волочения профилей приведен на рисунке 3.

Если готовая профильная труба не может быть получена за один переход - то необходимо определять калибровку инструмента на промежуточных размерах второго и последующих переходов.

Построение профиля поперечного сечения рабочего инструмента выполнили на основе положения, согласно которому перемещение частиц металла при пластической деформации подчиняется закону наименьшего сопротивления, что реализовано путем построения линий тока (траекторий перемещения металла), ортогональных профилю заготовки и профилю готовой трубы. Кроме того, должны быть построены замкнутые кривые, делящие на части линии тока, которые ортогональны им, и которые были названы эквипотенциалями.

Для определения положения линий тока металла, эквипотенциалей и профиля инструмента разработана методика их компьютерного построения, которая кратко выглядит следующим образом.

Строим наружный и внутренний (отверстие) контуры готовой трубы, которые принимаются за эквипотенциали. Далее эти кривые (для заготовки и готового профиля) описываем в программе Компас-График кубическими β – сплайнами Безье, которые выглядят следующим образом:

$$\tau=1-\tau 3P0+3\tau\ 1-\tau 2\ P1+\ \tau 3P3,\ \tau \in[0,1] \qquad (1)$$

Известно, что сплайн – это кривая, имеющая наименьшую кривизну, и проходящая через заданные точки, т. е. он является линией наименьшей длины. Кривые Безье отредактированы таким образом, чтобы при пересечении профилей касательные к ним были параллельны вспомогательным перпендикулярам. В границах участков строим кривые Безье (линии тока) через соответствующие точки начального профиля. В свою очередь, полученный набор кривых – линий тока делится на части, определяемые с л е д у ю щ и м о б р а з о м .

В соответствии с найденными α_n размечаем отрезки на линии тока и по полученным точкам в программе Компас-3D строим к этим линиям ортогонально кривые, называемые эквипотенциалями. Две соседние эквипотенциали определяют собой профили входного и выходного сечения необходимых волок. Примеры построения приведены на рисунке 4.

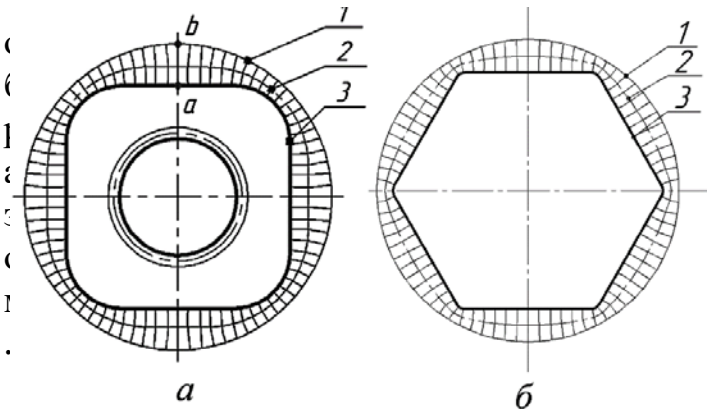

Рисунок 4 – Построение линий тока и эквипотенциалей: а – наружное профилирование: (1–заготовка, 2 – промежуточный переход, 3 – наружный контур готовой трубы); б – внутреннее профилирование (1 – внутренний диаметр заготовки, 2 – промежуточный переход, 3 – готовая труба

Н а х о д и м

=

При необходимости возможно сгущение линий тока. Эквипотенциали и линии тока криволинейного профиля показаны на рисунке 5.

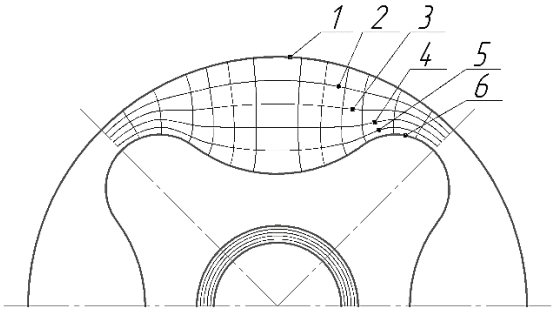

Рисунок 5 – Волочение криволинейного профиля в 5 переходов: 1-6- эквипотенциали

Определение продольного профиля инструмента. Полученные выше поперечные сечения в виде эквипотенциалей и расстояния между ними, измеренные по нормалям (линиям тока) позволяют определить длину рабочей части рабочего профилирующего инструмента. Вместе с тем необходимо определить боковую поверхность инструмента. С этой целью будем применять линейчатые поверхности, определяемые эквипотенциалями (рисунок 6).

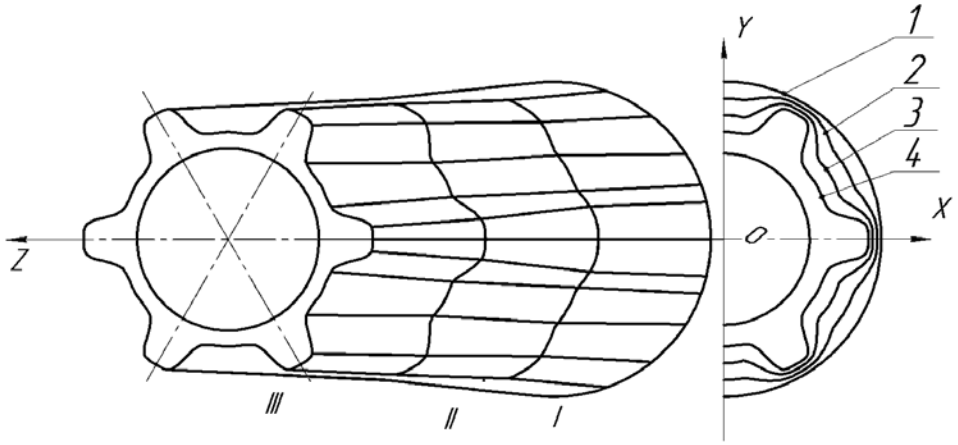

Рисунок 6 – Продольный профиль инструмента. I, II, III – калибровка волок. 1 – наружный контур заготовки; 2,3 – эквипотенциали первого и второго переходов; 4 – контур готовой трубы

Для правильных многоугольников строим регулярные коноиды с образующими в виде прямых линий. Условие параллелизма задаем требованием равномерного пересечения образующей во всех ее положениях с криволинейной направляющей и направляющими отрезками правильного многоугольника при однопроходном деформировании. Для криволинейных в поперечном сечении профилей строим регулярные цилиндроиды, у которых условие параллелизма есть требование равномерного распределения точек пересечения образующей во всех ее положениях с криволинейными направляющими, определенными двумя соседними эквипотенциалями.

Осевое расстояние между соседними эквипотенциалями может быть найдено, если известен угол наклона образующей боковой поверхности. Этот угол находим из условия минимума усилия волочения.

Математическая модель процесса содержит записанные в пространственной ортогональной системе координат следующие уравнения: равновесия, физические и геометрические уравнения, граничные условия задаем: на переднем конце трубы в виде перемещений, а на контактных поверхностях в виде касательных напряжений, определяемых законом Зибеля.

По найденным значениям механических переменных очага определены инварианты интенсивности деформаций и напряжений, гидростатическое давление.

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2},\ \sigma = \frac{(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)}{3}, T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2}, \lambda = \sqrt{3}\varepsilon_i \quad (3)$$

Поврежденность металла найдена по модели А.А. Богатова:

$$\omega = \sum_{i=1}^{n}\int_0^{\lambda_i}\frac{a\lambda^{a-1}}{\lambda_{\text{р}}{}^{a}}d\Lambda \quad (4)$$

Для определения энергосиловых параметров процесса волочения ТПТС построили обобщенную геометрическую модель очага деформации (рисунок 7). Решение выполнили на основе баланса мощностей.

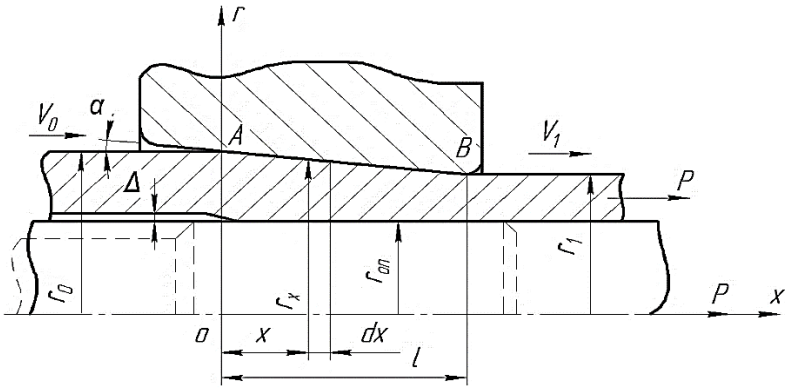

Рисунок 7 – Обобщенная расчетная схема очага деформации: сплошные линии – подвижная оправка, пунктирные – неподвижная оправка

Запишем уравнение баланса мощностей:

$$PV_1 = \sum_{i=1,2}\iint_{S_{\text{ср}}}\tau_{S_i}V_{\text{ср}_i}dS_{\text{ср}_i} + \iint_{S_{k_{\text{в}}}}\tau_{k_1}V_{k_1}dS_{k_1} \pm \iint_{S_{k_2}}\tau_{k_2}V_{k_2}dS_{k_2} + \iiint_V THdV. \quad (5)$$

Площадь поперечного сечения в очаге с координатой X:

$$F_x = \pi[(r_0 - x\,tg\alpha)^2 - r_{\text{оп}}^2]. \quad (6)$$

Продольная скорость течения металла:

$$V_x = V_0\frac{r_0^2 - r_{\text{оп}}^2}{(r_0 - x\,tg\alpha)^2 - r_{\text{оп}}^2}. \quad (7)$$

Радиальную скорость находим из условия несжимаемости:

$$V_r = -\frac{V_0 r_0^2 r\,tg\alpha}{(r_0 - x\,tg\alpha)^3}\left(1 - \frac{r}{r_{\text{оп}}}\right). \quad (8)$$

Скорость течения металла по контакту с волокой:

$$V_{k_1} = \frac{V_x}{\cos\alpha} = V_0\frac{r_0^2 - r_{\text{оп}}^2}{[(r_0 - x\,tg\alpha)^2 - r_{\text{оп}}^2]\cos\alpha}. \quad (9)$$

Мощность сил среза

$$\sum_{I=1,2} N_{cp_i} = \sum_{I=1,2} \iint_{S_{cp_I}} \tau_{S_i} V_{cp_i} dS_{cp_i} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \tau_{s_0} V_0 \pi r_0^2 \, tg\alpha \left[\left(1 - \frac{r_{оп}^3}{r_o^3} \right) + k \left(1 - \frac{r_{оп}^3}{r_1^3} \right) \right] \quad (10)$$

Мощность сил контактного трения с волокой и оправкой:

$$N_{k_1} = \int_0^{2\pi} \int_0^l \tau_{k_1} r_x V_{k_1} \frac{dx}{cos\alpha} d\Theta, \quad N_{k_2} = \int_0^{2\pi} \int_0^l \tau_{k_2} r_{оп} V_{k_2} dx d\Theta \quad (11)$$

Интенсивность скоростей деформации сдвига

$$H = V_0 r_0^2 tg\alpha \left[\frac{\left(12 + 9\bar{r}^2 \frac{tg\,\alpha}{r_0}\right)\left(1 - \frac{2r}{r_{оп}}\right)^2}{(r_0 - x\, tg\alpha)^6} \right]^{0,5} \quad (12)$$

Мощность внутренних сил

$$N_B = \int_0^{2\pi} \int_0^l \int_{r_{оп}}^{r_x} \tau_{S_x} H r dr d\Theta dx \quad (13)$$

В итоге полная мощность деформации:

$$N = \frac{2}{3\sqrt{3}} \tau_{S_0} V_1 F_k tg\alpha \left[\left(1 - \frac{{r_{оп}}^3}{{r_0}^3} \right) + k \left(1 - \frac{{r_{оп}}^3}{{r_1}^3} \right) \right] +$$
$$+ \psi \sigma_s (1 + k) V_1 F_k \left(1 - \frac{{r_{оп}}^2}{{r_0}^2} \right) \left[\frac{ln(r_0/r_1)}{sin\alpha\, cos\alpha} \pm \frac{r_{оп}}{tg\alpha} \frac{r_0 - r_1}{r_0 r_1} \right] + \quad (14)$$
$$+ \frac{\sqrt{3}}{2} \tau_{S_0} (1 + k) V_1 F_k \left(ln \frac{r_0}{r_1} - {r_{оп}}^2 \frac{{r_0}^2 - {r_1}^2}{{r_1}^2 {r_0}^2} \right).$$

В формуле (14) знак “+” для случая волочения труб на неподвижной оправке, а знак “-“ – для подвижной. Далее последовательно находим усилие волочения P и напряжение волочения $\sigma_{вол}$. Тогда коэффициент запаса прочности переднего конца $K_з = \frac{\sigma_{вол}}{\sigma_{S_0}(1+k)}$, а оптимальный угол волоки $\partial\rho / \partial\alpha = 0$. Формулы для P и $\sigma_{вол}$ корректировали по методу Г.Я. Гуна для некруглых профилей. Приведенные формулы использованы в автоматизированной системе выбора параметров ТПТС.

Численная реализация и параметрический анализ полученной модели возможны лишь на основе конечно-элементного метода. В этой связи в работе рассмотрены основные процедуры и выполнены построения, которые позволяют создать конечно-элементную модель очага деформации с учетом его особенностей.

В третьей главе проведен параметрический анализ процесса профилирования ТПТС на неподвижной оправке.

На основе разработанных геометрических моделей построена конечно – элементная модель очага деформации. Дальнейшее решение выполнено на примере волочения трубы на круглой неподвижной оправке с наружным профилированием шестигранника в один проход.

Этапы разработки модели: создание твердотельной модели канала волоки, построение объемной модели корпуса волоки, создание трехмерной

модели волоки и оправки, задание симметрии задачи, передача моделей в конечно – элементный пакет, моделирование трубной заготовки и ее позиционирование с инструментом, задание вида конечных элементов и свойств материала инструмента и заготовки, разбивка областей на элементы, задание граничных условий и контактного взаимодействия, решение задачи и постпроцессорная обработка. С использованием адаптивной сетки максимально общее число элементов составляло 250-300 тыс. (рисунок 8), что обеспечивает необходимую точность и приемлемое время расчета.

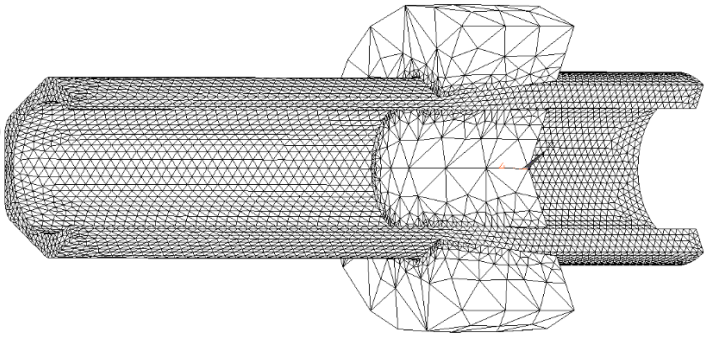

Рисунок 8 – Конечно-элементная модель очага деформации

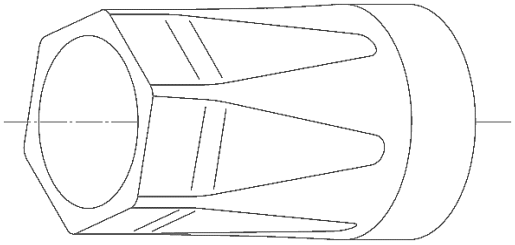

Рисунок 9 – Формирование границ контактной зоны на гранях профиля трубы

Варьирование размерами заготовки показало, что при уменьшении толщины стенки сверх допустимой по расчёту происходит незаполнение внутренних ребер профиля. По мере продвижения трубы в волоке контактная площадь возрастает, а радиус ребер уменьшается от наружного радиуса заготовки до радиуса, определяемого внеконтактной зоной (рисунок 9).

Более подробно изменение радиуса грани трубы показано на рисунке 10, где на трехмерной модели эта картина показана в развитии процесса. Видно, как уменьшается контур граней волоки и конечный радиус ребра трубы. С ростом показателя трения незаполнение растет. Марка материала мало меняет эту тенденцию.

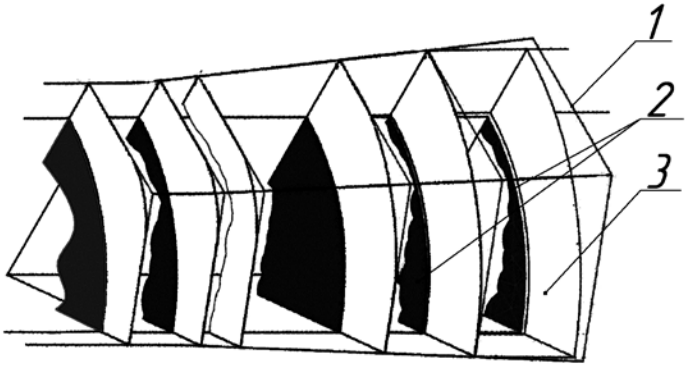

Рисунок 10 – Изменение радиуса ребер профиля вдоль очага деформации: 1 – контур волоки, 2 – положение оправки, 3 – формоизменение трубы

Интенсивность деформации переменна по сечению и такое мало зависит от марки материала (рисунок 11).

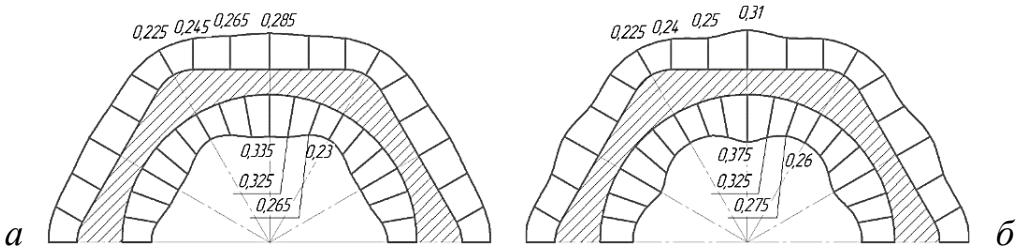

Рисунок 11 – Распределение интенсивности деформации в выходном сечении трубы. а – сплав ВТ1-0, б – сталь 10; показатель трения ψ=0,09

Контактное давление в очаге деформации необходимо находить как для волоки, так и для оправки. Этот показатель необходимо определять по следующим причинам: на основе расчета контактного давления возможен выбор материалов волок и оправок; возможно определение стойкости инструмента и подбор технологической смазки; необходимо также находить осевое усилие, действующее на оправку.

Максимум контактного давления (рисунок 12) возникает в области начала контактной поверхности. Далее по мере развития контактной поверхности давление распространяется на большую площадь, одновременно величина давления снижается. Для различных материалов характер эпюры схож, а величина давления различна. Для титана ВТ1-0 в сравнении со сталью 10 величина давления выше, однако относительная величина пика давления составляет в обоих случаях в относительных величинах примерно 2,5 $\sigma_{0,2}$. На оправке контактная эпюра давления имеет более плавный характер. Возникновение пика давления на оправке начинается несколько позднее, чем на волоке, а относительное значение давления сохраняется.

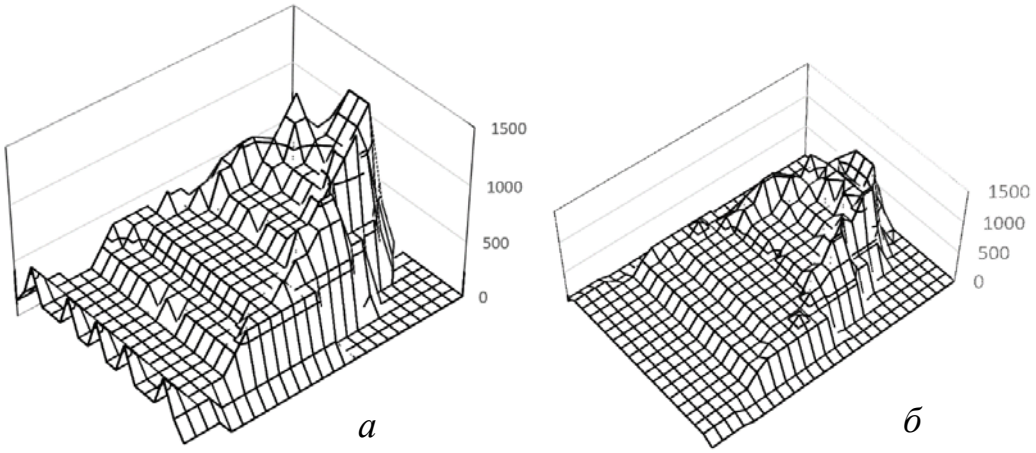

Рисунок 12 – Распределение контактного давления по поверхности очага деформации: а – волока, б – оправка. Материал трубы- титан ВТ1-0,ψ=0,09

Показатель напряженного состояния вдоль оси волочения по наружной поверхности очага деформации изменяется от отрицательного значения к положительному при всех значениях показателя трения. При этом для сплава ВТ1-0 максимум расположен в середине грани с незначительным уменьшением на ребре (для показателя трения ψ=0,005). С увеличением показателя трения до 0,09 эта зависимость меняется на обратную, а именно максимум значения σ/T – на ребре, а минимум в середине грани (рисунок 13).

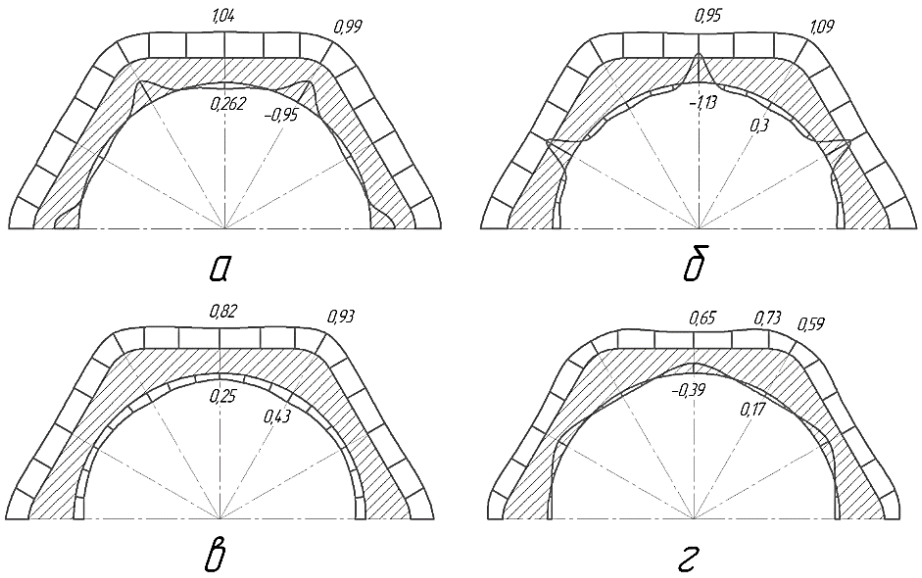

Рисунок 13 – Распределение показателя напряженного состояния σ/T в плоскости выхода по сечению трубы: для сплава ВТ1-0 при ψ=0,005 (а) и ψ =0,09 (в) и стали 10 при ψ=0,005 (б) и ψ=0,09 (г)

Для стали 10 при ψ=0,005 максимум расположен на ребре профиля, а минимум в середине грани. С увеличением показателя трения до 0,09 максимум будет в середине грани, а минимум на ребре профиля. На внутренней поверхности распределение показателя напряженного состояния более сложное, чем для наружной поверхности. Так, для сплава ВТ1-0 при низком показателе трения на ребрах показатель σ/T имеет отрицательное значение, весьма большое по модулю. Для стали 10 картина противоположная: минимум показателя напряженного состояния (отрицательное значение) в области середины грани, а в области ребер профиля показатель напряженного состояния имеет положительное значение.

Поврежденность металла является величиной, которая определяется как интенсивностью деформации, так и напряженным состоянием. Эти показатели, в свою очередь, зависят от вытяжки, механических свойств металла, контактного трения и пластичности металла. Для рассматриваемого случая их сочетание таково, что на наружной поверхности поврежденность металла меняется мало (рисунок 14).

Так, для титана ВТ1-0 при низком показателе трения поврежденность максимальна в середине грани, а на ребрах профиля несколько меньше. Для стали 10 в этом случае поврежденность не изменяется. С ростом показателя трения до 0,09 для ВТ1-0 на наружной поверхности поврежденность не изменяется по сечению, а для стали 10 этот показатель несколько растет на гранях. Для внутренней поверхности изменения также невелики. Так, при ψ=0,005 для титана ВТ1-0 поврежденность больше в середине грани, чем в области ребра профиля. Аналогичное распределение при ψ=0,005 для стали 10. При ψ=0,09 поврежденность титана ВТ1-0 также больше в середине грани и несколько меньше на ребре профиля. Аналогичное распределение поврежденности при ψ=0,09 наблюдается и для стали 10.

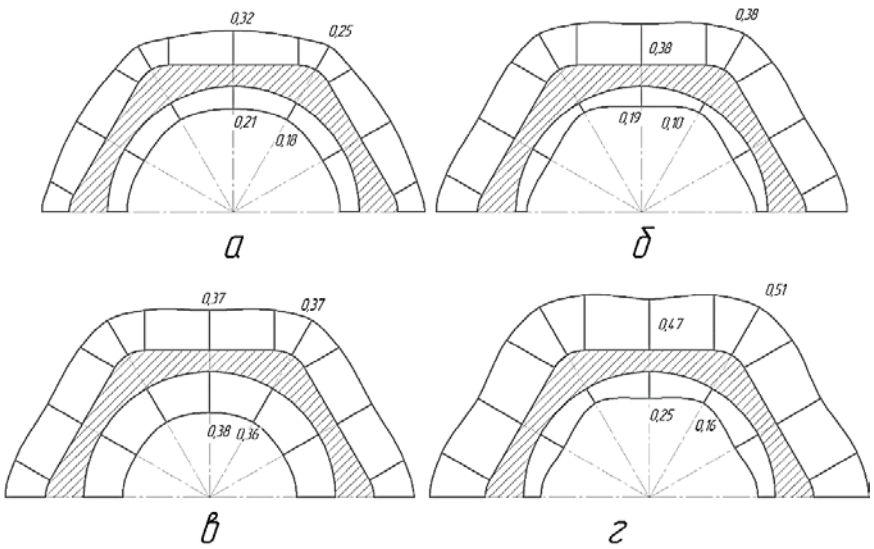

Рисунок 14 – Распределение поврежденности металла по сечению трубы: для сплава ВТ1-0 при ψ=0,005 (а) и ψ=0,09 (в) и стали 10 при ψ=0,005 (б) и ψ=0,09 (г)

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию процесса волочения ТПТС, разработке рекомендаций по совершенствованию этого процесса и применению устройств, позволяющих повысить эффективность технологического процесса. Определены цели и задачи эксперимента, приведено описание особенностей использованной аппаратуры и методики экспериментального исследования. Экспериментальное исследование проводилось для получения данных по оценке адекватности теоретических результатов.

Цели эксперимента состоят в следующем: исследование процесса формоизменения заготовки при получении труб с переменной толщиной стенки, определение конфигурации очага деформации и, в особенности, границ контактной поверхности металла с рабочим инструментом и ее формы, оценка сопоставления теории и эксперимента по размерам изделий, нахождение инвариантных оценок деформированного состояния (интенсивности деформации и параметра Лоде).

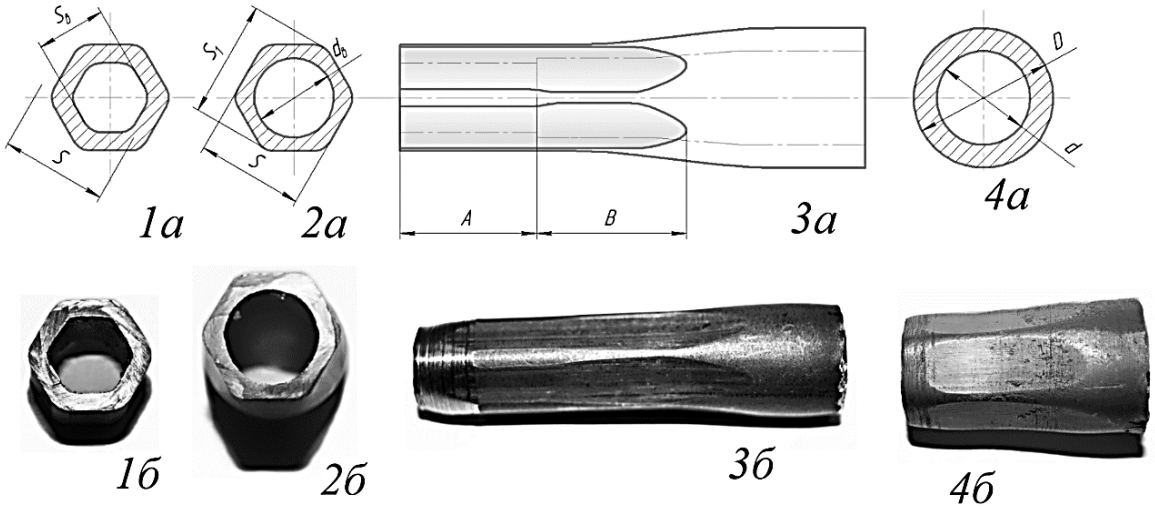

Рисунок 15 – Построение очага деформации по результатам эксперимента

Таблица 1 – Сравнение геометрических параметров профиля по данным теории и эксперимента

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Длина линии контакта, мм	19,25	Площадь контакта, мм^2	35,1	Площадь поперечного сечения трубы, мм^2	216,2
То же, теория, мм	19,0	То же, теория, мм^2	34,8	То же, теория, мм^2	220,1
Отклонение эксперимента и теории, %	1,3	Отклонение эксперимента и теории, %	0,9	Отклонение эксперимента и теории, %	1,9

Для достижения поставленных целей необходимо: определить фактические значения параметров кривых упрочнения исследуемых образцов труб, получить реальные значения геометрии волочильного инструмента для последующего моделирования и сравнения теоретических значений и данных, полученных экспериментально, дать темплеты очага деформации при волочении, замерить полученные размеры протянутых образцов труб и сравнить их с теоретическими результатами.

Таблица 2 – Сравнение величин незаполнения углов профиля по данным теории и эксперимента

№ п/п	Параметр	Группа образцов 1	Группа образцов 2
1	Размер профиля под ключ *S*, мм	10,35 10,34 10, 35	10,49 10,47 10,48
2	Размер профиля по ребрам *D*, мм	11,20 11,19 11,21	11,64 11,57 11,62
3	Статистическая оценка ВДП$_S$, мм	10,36	10,50
4	Статистическая оценка НДП$_D$, мм	11,18	11,60
5	Абсолютное значение незаполнения углов профиля, Δ, мм	0,2 0,2 0,2	0,06 0,08 0,06
6	Статистическая оценка ВДП$_\Delta$, мм	0,25	0,09
7	Статистическая оценка НДП$_\Delta$, мм	0,18	0,05
8	Математическое ожидание незаполнения $\Delta_э$, мм	0,142	
9	Теоретическое значение незаполнения, $\Delta_Т$, мм	0,15	
10	Отклонение теоретического значения математического ожидания $\Delta_Т$ от экспериментального $\Delta_э$, %	5,33	

Сравнение теории и эксперимента производили по следующим параметрам: по форме границ очага деформации, по длине линии границы

очага деформации, по площади контактной зоны, по размерам профиля по граням и по ребрам, по величине незаполнения углов профиля, по показателям интенсивности деформации и параметру Лоде. Пример полученных экспериментально картин очага деформации и полученных образцов труб приведен на рисунке 15. При этом на участке *A* осуществлено безоправочное волочение, а на участке *B* – волочение на оправке. Обработанные на основе статистических оценок данные приведены в таблицах 1 и 2, они показывают хорошую сходимость с теорией.

Определение деформированного состояния выполнено по методу Г.А. Смирнова-Аляева на основе изучения микрошлифов протянутых труб. При этом теоретическое значение интенсивности деформации составило $\varepsilon_i^{\text{т}} = 0{,}3868$, а экспериментальное - $\varepsilon_i^{\text{э}} = 0{,}3676$, отклонение результатов было 4,26%, а параметр Лоде в обоих случаях было около нуля.

Далее рассмотрены направления совершенствования, которые состояли в следующем: выбор конфигурации рабочего инструмента, выбор размеров заготовки, особенности подготовки заготовок к волочению, элементы технологии изготовления волочильного инструмента (рисунок 16), где показаны 3D модели электродов для обработки рабочих каналов волоки, имеющей форму гипотрохоиды, выбор оборудования, позволяющего повысить эффективность процесс профилирования.

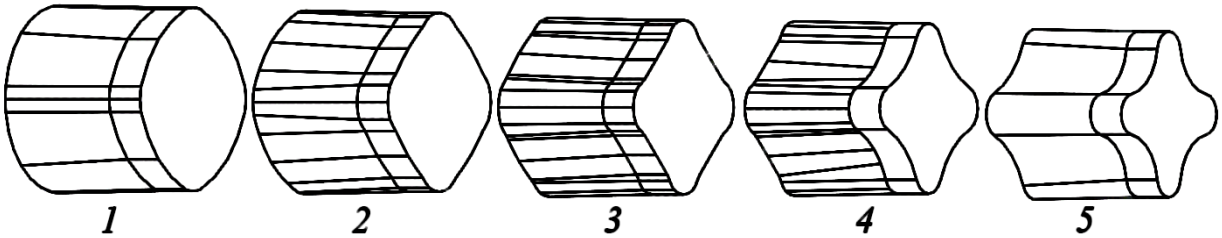

Рисунок 16 – Построение формы электродов для чистовой обработки каналов волок: 1-5 – переходы волочения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненной работы таковы - работа является результатом исследований, направленных на совершенствование процесса и выбора параметров рабочего инструмента для изготовления труб с переменной по периметру поперечного сечения толщиной стенки, а также на получение рекомендаций по применению оборудования, обеспечивающего при реализации этого процесса наибольшую эффективность.

По итогам выполнения диссертационной работы можно сформулировать следующие **выводы и рекомендации**:

1. Для исследования процесса волочения труб с переменной толщиной стенки, имеющих наружное и внутреннее профилирование при одно- и многопереходной деформации необходима разработка комплексных моделей, включающих твердотельные модели очага деформации, учитывающие калибровку рабочего инструмента, механические свойства материала и

контактное трение, а также использование полной системы уравнений теории пластичности, содержащей уравнения равновесия, зависимость деформаций от перемещений и физические уравнения связи напряжений и деформаций для пространственного случая.

2. С применением компьютерной графики разработана автоматизированная система выбора размеров трубной заготовки, а также поиска конфигурации и размеров труб на промежуточных переходах, которая основывается на учете особенностей течения металла и стандартных размерах заготовки и может быть использована для расчетов процесса оправочного волочения труб, имеющих поперечное сечение в виде правильных многоугольников или в виде криволинейных профилей.

3. Калибровка рабочего инструмента произведена на основе построения линий тока металла, ортогональных исходному и конечному профилям трубы, а также эквипотенциалей, ортогональных линиям тока, при этом использование сплайнов Безье позволяет удовлетворить граничным условиям контуров профиля и основано на применении принципа наименьшего действия. Деление линий тока на части, пропорциональные необходимым значениям вытяжек по переходам и расположение по точкам деления эквипотенциалей позволяет описать входное и выходное поперечное сечение инструмента на заданных переходах волочения как при одно-, так и при многопереходном процессах деформации.

4. В работе приведены примеры выбора размеров, построения линий тока и эквипотенциалей для конкретных случаев выполнения профиля поперечного сечения инструмента на основе регулярных многоугольников или криволинейных профилей, как для однопроходного, так и для нескольких переходов волочения.

5. Использование уравнения баланса мощностей с учетом внеконтактных зон, мощности сил контактного трения на волоке и оправке, и мощности пластической деформации при учете упрочнения металла, закона Зибеля и соотношения Мизеса позволило определить усилие волочения профильных труб на подвижной и неподвижной оправках.

6. Сложное геометрическое описание комплексных моделей очага деформации, основанное на наличии плоскостной симметрии пластической области и при учете упрочнения металла и контактного трения, а также необходимости локального определения механических переменных и использованию универсального метода решения задач теории пластической деформации – метода конечных элементов.

7. Применение разработанной комплексной модели процесса и метода МКЭ позволяет, на примере профилирования трубы в шестигранник на круглой оправке, найти необходимые локальные характеристики деформации: интенсивность деформаций, контактное давление, показатель напряженного состояния и поврежденность, а также формоизменение трубы.

8. Экспериментальное исследование, поставленное в условиях, отражающих реальный процесс и результаты эксперимента, обработанные

статистически, позволили заключить, что расхождение теории и эксперимента находится в допустимых пределах, а допущения модели – корректны.

9. Результаты исследования волочения, проведенного на предложенных моделях и данные экспериментов позволили разработать предложения по совершенствованию процесса и рекомендовать использование оборудования, применение которого позволит повысить эффективность оправочного волочения труб.

Методики и результаты работы используются в учебном процессе при подготовке студентов ФГАОУ ВО УрФУ им. Б.Н. Ельцина по направлению «Технологические машины и оборудование». Разработки по совершенствованию процесса и инструмента для изготовления труб с переменной толщиной стенки переданы АО «Первоуральский новотрубный завод», и рекомендованы им для использования.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в следующем:

- создание прикладного программного обеспечения для расчета геометрических параметров инструмента и готовой трубы, обладающего высокой универсальностью в отношении формы рассматриваемых труб;
- применение разработанной методики при расчете параметров заготовки при профилировании в один и несколько переходов;
- разработка комплексной технологической последовательности быстрого изготовления волочильного инструмента с рациональной формой и заданными свойствами;
- совершенствование конструкций волочильного оборудования для получения готовой продукции, в полной мере отвечающей требованиям заказчиков и действующих стандартов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Паршина, А.А. Особенности моделирования очага деформации при волочении труб с переменной по сечению толщиной стенки / А.А. Паршина // Производство проката, - 2015. – №12. - С. 26-29. (0,4 п.л.)
2. Паршина, А.А. Определение профиля рабочего инструмента для волочения труб с переменной толщиной стенки / А.А. Паршина // Производство проката. – 2017. - №3. - С.36-48. (0,4 п.л.)
3. Паршина, А.А. Автоматизированная система расчета параметров заготовки для изготовления труб с переменной толщиной стенки волочением / А.А. Паршина // Производство проката. - 2017. - №12. - С. 33-38. (0,4 п.л.)

В других изданиях:

1. Паршина, А.А. Компьютерное моделирование процесса обработки давлением при получении профильных труб с переменной толщиной стенки / А.А. Паршина, С.В. Паршин // Инженерная мысль машиностроения будущего: Сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической

конференции с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 93-96. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

2. Паршина, А.А. Создание модели процесса получения труб с переменной толщиной стенки / А.А. Паршина // Обработка сплошных и слоистых материалов. -2014. - №2. - С. 59-62. (0,3 п.л.)

3. Паршин, С.В. Особенности производства профильных труб / С.В. Паршин, А.А. Паршина // Научный электронный архив. – 2014. – Режим доступа: http://econf.rae.ru/article/7126 (0,34 п.л. / 0,1 п.л.)

4. Паршина, А.А. Компьютерное моделирование процесса волочения труб с переменной толщиной стенки / А.А. Паршина, Г.Л. Баранов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. Материалы II международной заочной научно-практической конференции. - Новокузнецк, СибГИУ, 2014. - С. 104-105. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

5. Спиридонов, В.А. К вопросу исправления внутренней гранености труб с помощью волочения на самоустанавливающейся оправке / В.А. Спиридонов, Е.А. Митюшов, А.А. Паршина. // Сборник научных трудов конференции: «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика». Екатеринбург: УрФУ, 2015. -С. 515-522. (0,2 п.л. / 0,14 п.л.)

6. Паршина, А.А. Инновационные принципы 3d проектирования инструмента для изготовления его с использованием аддитивной технологии / А.А. Паршина // Труды IV Международной молодежной научной конференции «ФТИ-2017». - Екатеринбург, УрФУ, 2017. - С. 224-225. (0,2 п.л.)

7. Паршина, А.А. Энергосиловые параметры процесса волочения круглых прутков / А.А.Паршина // Сборник «Обработка сплошных и слоистых материалов». Магнитогорск: МГТУ, 2017. - №1. - С.10-16. (0,2 п.л.)

8. Паршина, А.А. Алгоритмизация процесса проектирования инструмента для волочения труб с переменной толщиной стенки / А.А. Паршина, Г.Л. Баранов // Труды XI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) AS’2017 «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве», - Новокузнецк, СибГИУ, 2017. - С. 168-171. (0,3 п.л. / 0,24 п.л.)