

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

На правах рукописи

Паршина Анастасия Анатольевна

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

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Раскатов Евгений Юрьевич, доктор технических наук

Екатеринбург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ И МАШИНЫ ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ. МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ.....	10
1.1. Сортамент труб с переменной по периметру толщиной стенки, процессы и машины для их производства	10
1.2. Методы построения калибровки инструмента, определение размеров заготовки.	26
1.2.1. Построение профиля рабочего инструмента	27
1.2.2. Определение параметров заготовки для волочения.....	34
1.3. Методы теоретического исследования механики очага деформации....	35
1.3.1. Определение напряженно-деформированного состояния металла.	35
1.3.2. Усилие волочения профильных труб с переменной толщиной стенки .	37
1.4 . Постановка задач исследования.....	42
1.5. Выводы по главе 1	45
ГЛАВА 2. МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ	46
2.1. Твердотельные модели очага деформации при волочении ТПТС.....	47
2.2. Разработка метода калибровки рабочего инструмента.....	52
2.2.1. Автоматизированная система выбора размеров заготовки ТПТС.	52
2.2.2. Линии тока металла, эквипотенциали и профиль инструмента	64
2.3. Уравнения механики деформирования и инварианты напряженно – деформированного состояния.....	73
2.4. Расчет усилия волочения труб с переменной толщиной стенки.	79
2.5. Основы расчета напряженно – деформированного состояния металла методом конечных элементов	86
2.6. Допущения моделей.	90
2.7. Выводы по главе 2	91
ГЛАВА 3. НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОВРЕЖДЕННОСТЬ МЕТАЛЛА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ.....	93

3.1. Построение конечно – элементного аналога моделей очага деформации.....	93
3.2. Особенности формоизменения и течения металла при волочении ТПТС на оправке и деформированное состояние металла	107
3.2.1. Формоизменение металла	107
3.2.2. Напряженное состояние	118
3.2.3. Поврежденность металла при волочении	119
3.3. Выводы по главе 3	121
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТПТС	123
4.1. Цели и задачи эксперимента.....	123
4.2. Аппаратура, образцы и методики эксперимента	124
4.2.1. Аппаратура	124
4.2.2. Условия проведения опытов и методики экспериментов.	127
4.3. Результаты экспериментального исследования и сравнение с теорией.....	132
4.4. Разработка рекомендаций по совершенствованию процесса профилирования, инструмента и выбору оборудования	138
4.4.1. Совершенствование процесса и профилирования инструмента	138
4.4.2. Выбор оборудования.	143
4.5 Выводы по главе 4.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	155

ВВЕДЕНИЕ

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. Решение указанных вопросов определяет актуальность работы.

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, либо производить заготовительное волочение с целью получения необходимых размеров заготовки. 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, параметров заготовки и величины коэффициента трения на форму готовой трубы, в частности 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 основана на полной системе уравнений теории пластичности. Математическая модель определения энергосиловых параметров процесса волочения получена 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 при использовании профильной волоки или оправки.
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).

ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ И МАШИНЫ ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ. МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

В главе рассмотрены существующие способы и машины для изготовления труб с переменной по сечению толщиной стенки: прессование, горячая и холодная прокатка, волочение, ковка. Показано, что трубы, имеющие поперечное сечение в виде правильного многоугольника или криволинейный профиль могут быть весьма эффективно получены путем волочения. Рассмотрены известные методы построения калибровок волочильного инструмента для изготовления фасонных сплошных профилей, методы теоретического исследования напряженно – деформированного состояния металла в очаге деформации при волочении, определение усилия волочения. На этой основе выполнена постановка задач исследования.

1.1. Сортамент труб с переменной по периметру толщиной стенки, процессы и машины для их производства

Трубы с переменной по периметру толщиной стенки (ТПТС) весьма разнообразны по сортаменту и материалам, производятся многими известными способами. Эти изделия применяются в качестве элементов конструкции, а также являются полуфабрикатами для производства разнообразных изделий.

Производство их возможно путем прессования, горячей прокатки, холодной прокатки на станах ХПТ и ХПТР и оправочного волочения [1].

Прессование. Процесс прессования состоит в том, что, выдавливая металл пуансоном из контейнера через фигурное отверстие матрицы, в которой установлена игла, получают заданную форму поперечного сечения изделия. Другой вариант прессования состоит в том, что в процессе участвует фигурная игла, позволяющая получать полые изделия заданной формы по внутреннему каналу. Прессованием возможно получение полых профилей

такой сложной формы, которую получить другими способами невозможно. К достоинствам прессования следует отнести высокую пластичность металла, что позволяет получить большие вытяжки, мобильность процесса, высокую точность и чистоту поверхности полученных изделий [2].

Схема процесса прямого прессования с иглой приведена на рис.1.1.

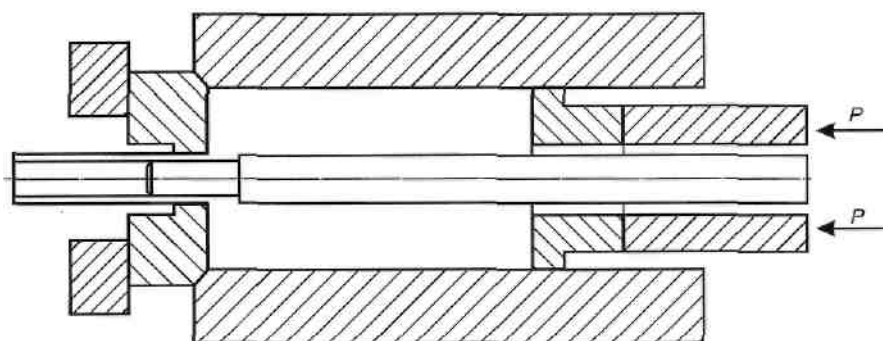


Рис. 1.1. Прямое прессование трубы с неподвижной иглой.

Прессованные трубы по сортаменту отличаются большим разнообразием. Производят их с внутренними и наружными ребрами, многоканальные и другие (рис.1.2).

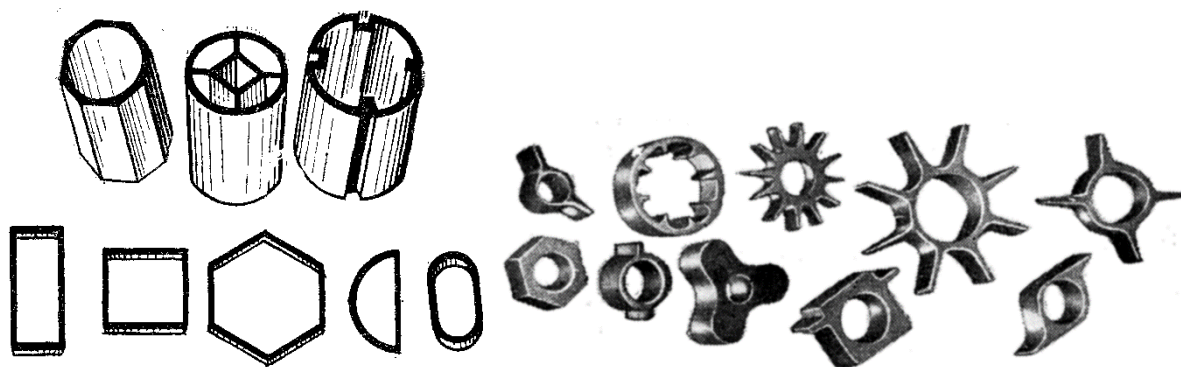


Рис. 1.2. Профильные трубы, получаемые прессованием.

Для получения труб, имеющих, например, высокие наружные ребра, применяют специальные матрицы (рис. 1.3). Здесь прессование происходит при наличии различной толщины отдельных элементов, и на этих участках требуется создать дополнительные зоны интенсивной деформации. Для этого на матрице профилируют специальные питатели с углом наклона к оси прессования 45—60 градусов [3].

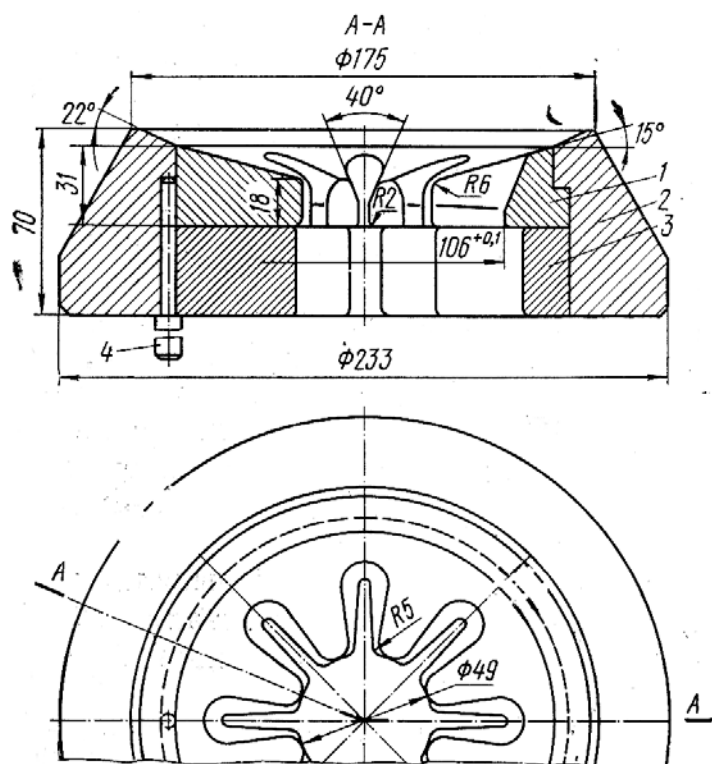


Рис. 1.3. Матрица для прессования профильных труб:
1 - кольцо, 2 - обойма, 3 - опорное кольцо, 4 – фиксатор.

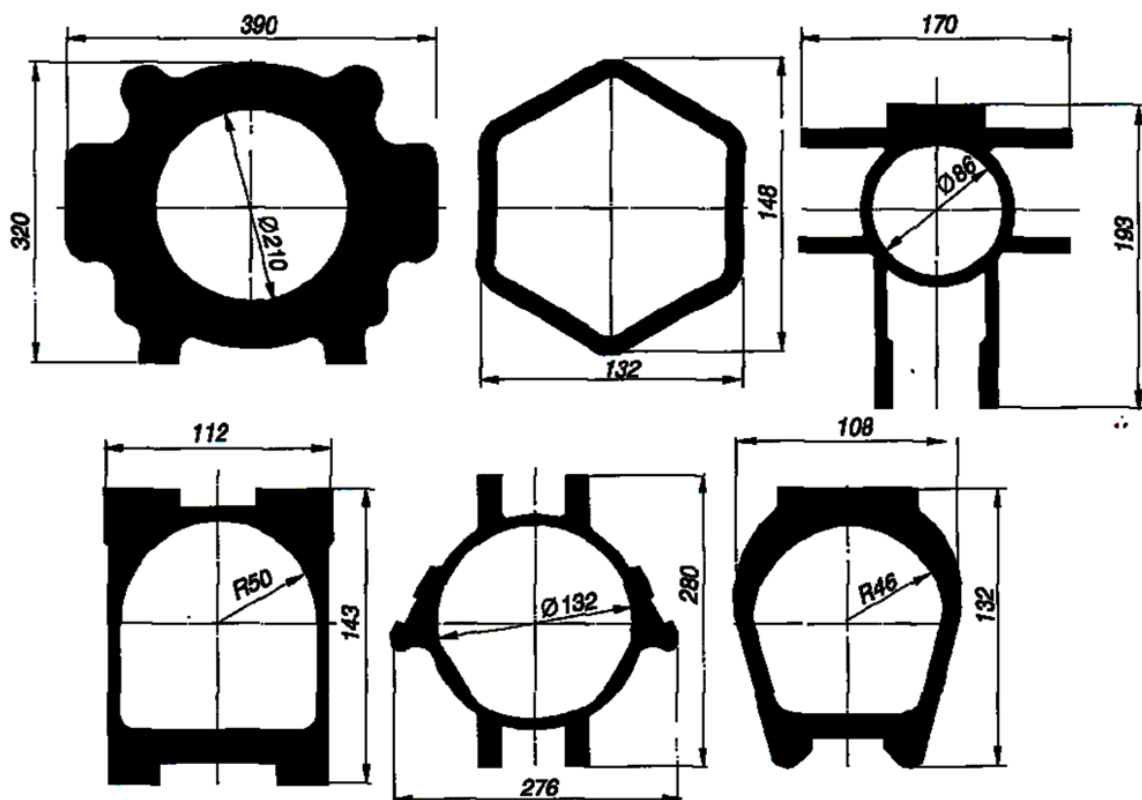


Рис. 1.4. Полые профили больших типоразмеров, полученные прессованием.

Поскольку пластичность металла при прессовании повышена, то возможно прессование профильных труб сложной формы (рис. 1.4). Распространена схема производства, когда прессованием получают профильные трубы с ребрами повышенной толщины. Такие трубы являются заготовками для последующего волочения [2].

Горизонтальный пресс [2] для прямого прессования труб и профилей (рис. 1.5) содержит в своем составе силовую раму, состоящую из передней 5 и задней 12 поперечин, которые связаны между собой колоннами 11. На переднюю поперечину через затвор 6 опирается мундштук 8 с примыкающим к нему контейнером 9. В задней поперечине установлены силовые гидравлические цилиндры 13 для перемещения пресс-штемпеля 10. Эти цилиндры обеспечивают прямое и возвратное движение. Пресс снабжен прошивным устройством 14. Мундштук выводится из поперечины гидравлическими цилиндрами 1, которые установлены в раме приемного стола 2. Затвор 6 поднимается вверх гидравлическими цилиндрами 7. Отрезание изделия от пресс-остатка производится пилой 4 или ножницами 2.

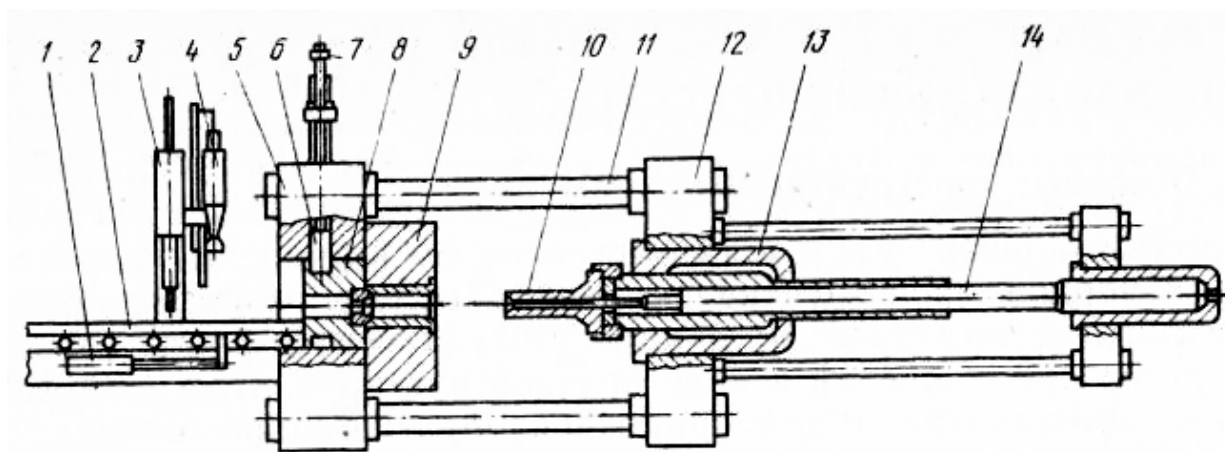


Рис. 1.5. Принципиальная схема горизонтального трубопрофильного прессы.

Горячая прокатка. Сортамент профильных труб, получаемых горячей продольной прокаткой, ограничен [4]. Это трубы квадратного либо шестигранного сечения (рис. 1.6, 1.7), либо плавниковые трубы (рис. 1.8). Прокатку выполняют в двухвалковых или трехвалковых клетях (рис. 1.9). Достаточно широкими возможностями для получения профильных труб

обладает пильгерстан. Здесь прокатка производится двумя валками, имеющими ручей конической формы и вращающимися в одном направлении. Подача трубы-заготовки (рис. 1.10) осуществляется в очаг деформации периодически на оправке-дорне. Возможно прокатывать разнообразный сортамент профильных труб, например, с переменной в поперечном сечении толщиной стенки: квадратные или трехгранные с круглым отверстием [5, 6]. Горячую прокатку профильных труб следует применять для получения сравнительно больших партий однотипных изделий.

Профильные трубы с переменной толщиной стенки производят холодной прокаткой на станах ХПТ и ХПТР, которые различаются типом рабочего инструмента (валки или ролики).

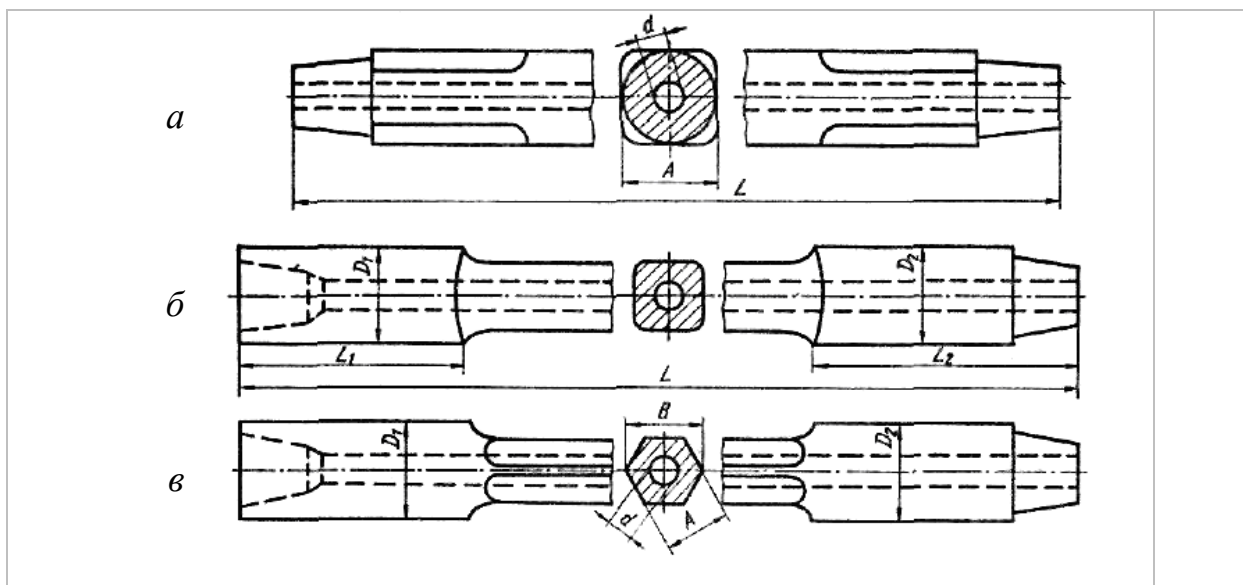


Рис. 1.6. Ведущие бурильные трубы сборной конструкции (а) с утолщенными концами квадратного (б) и круглого (в) сечений.

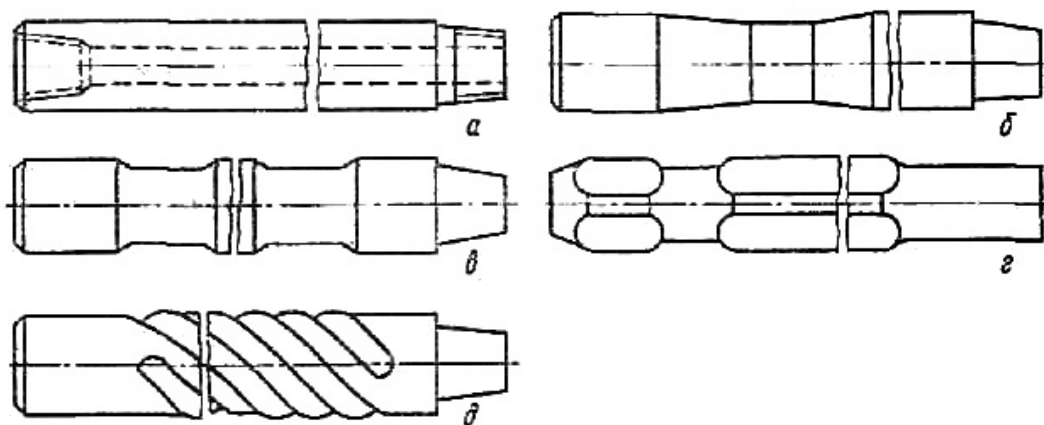


Рис. 1.7. Утяжеленные бурильные трубы.

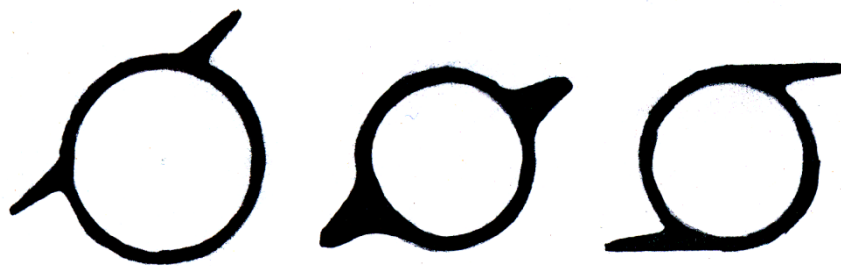


Рис. 1.8. Плавниковые трубы.

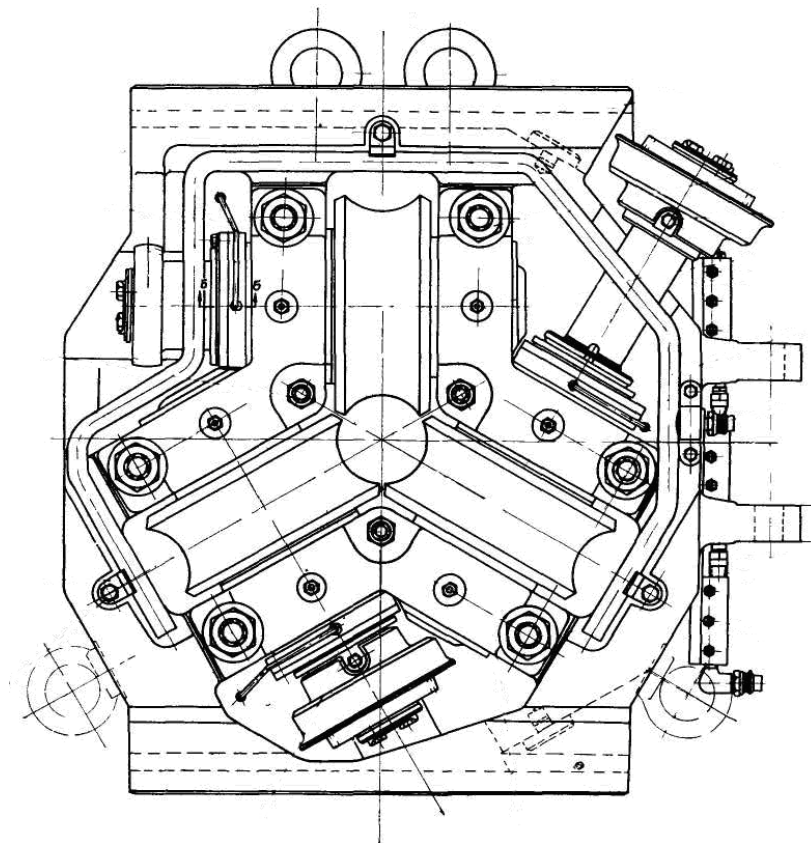


Рис. 1.9. Рабочая клетка с раздельными приводами трех валков.

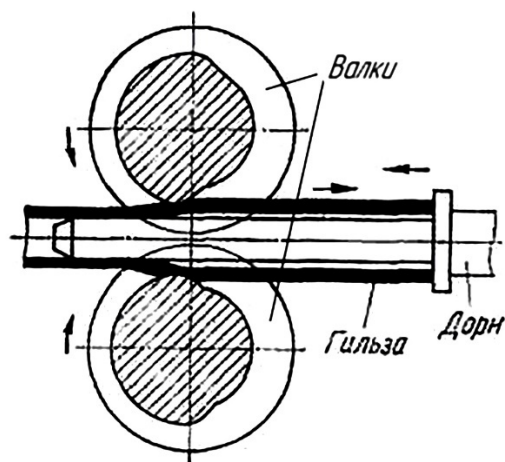


Рис. 1.10. Схема раскатки гильзы в трубу на пильгерном стане.

Прокатка на станах холодной прокатки труб. Схема процесса (рис. 1.11) состоит в том, что трубы прокатывают на удерживаемой оправке в валках, имеющих боковой поверхности конический ручей, причем валки движутся, совершая качательное и возвратно-поступательное движение [7]. Труба подается в очаг деформации периодически на величину подачи, и после хода валков «вперед-назад» процесс повторяется. Достоинства процесса: благоприятная схема напряженного состояния металла и высокая дробность деформации позволяют прокатывать трубы с большими вытяжками, высокой точностью размеров готовых труб. Недостатком процесса является его низкая производительность.

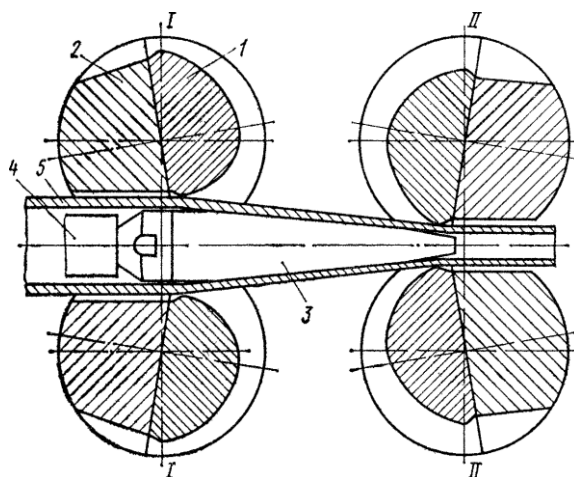


Рис. 1.11. Схема процесса холодной прокатки труб: I-I—крайнее, левое положение валков; II-II— крайнее правое положение валков; 1—рабочая часть валка; 2—валок; 3—оправка; 4—стержень оправки; 5—прокатываемая труба.

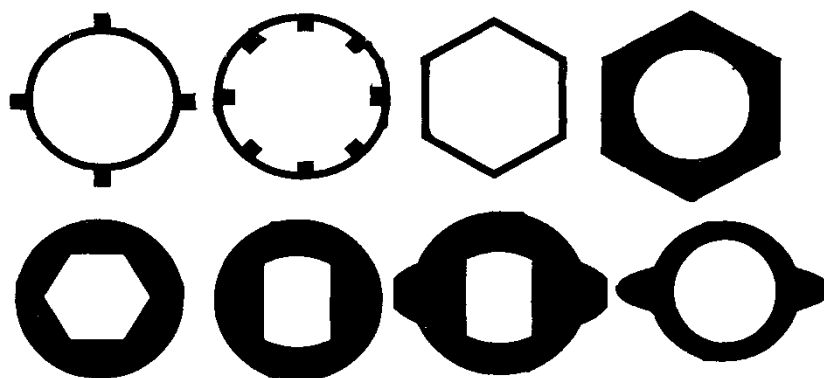


Рис. 1.12. Профильные трубы, полученные на станах ХПТ и ХПТР.

Рабочая клеть стана ХПТ содержит рабочие валки 2 с установленными на них калибрами с коническим ручьем. Коническая оправка 3 удерживается стержнем 4, закрепленным неподвижно, труба 5 подается в очаг деформации, когда рабочие валки, приводимые в движение кривошипно-шатунным механизмом, находятся в переднем положении. Также периодически осуществляется поворот трубы.

На станах такого типа можно изготовить трубы переменного профиля:

1. С местными утолщениями стенки, которые можно получить отводом оправки и последующей ее подачей в очаг деформации при прокатке с помощью автоматического устройства;
2. С переменной по длине толщиной стенки;
3. С переменными по длине наружным диаметром, внутренним диаметром или толщиной стенки;
4. С переменной по периметру толщиной стенки.

Для получения труб с внутренними продольными ребрами применяют профильные оправки, имеющие на боковой поверхности соответствующие выступы и впадины. Выполняя соответствующую калибровку ручья калибров, можно получать трубы с некруглой наружной поверхностью. Возможно сочетание с использованием калибров, имеющих некруглое поперечное сечение, и профильной оправки с целью профилирования как наружной, так и внутренней поверхности трубы [8]. Некоторые виды таких труб показаны на рис. 1.12.

Рабочая клеть стана холодной прокатки (рис. 1.13) состоит из неподвижной рамы 1 с установленными в ней рельсами 2. По ним с помощью бегунков 3 движется возвратно-поступательно рабочая клеть, содержащая установленные в ней пару рабочих валков 4, на шейки которых насажены ведущие шестерни 5, приводимые в движение при движении клетки от неподвижных зубчатых реек 7. Верхний и нижний валки синхронизируются с помощью зубчатых колес 8. Валки установлены на подшипниках качения 9 в рабочей клетке 10. Рабочие валки содержат рабочие калибры 11, осуществляющие процесс прокатки [7].

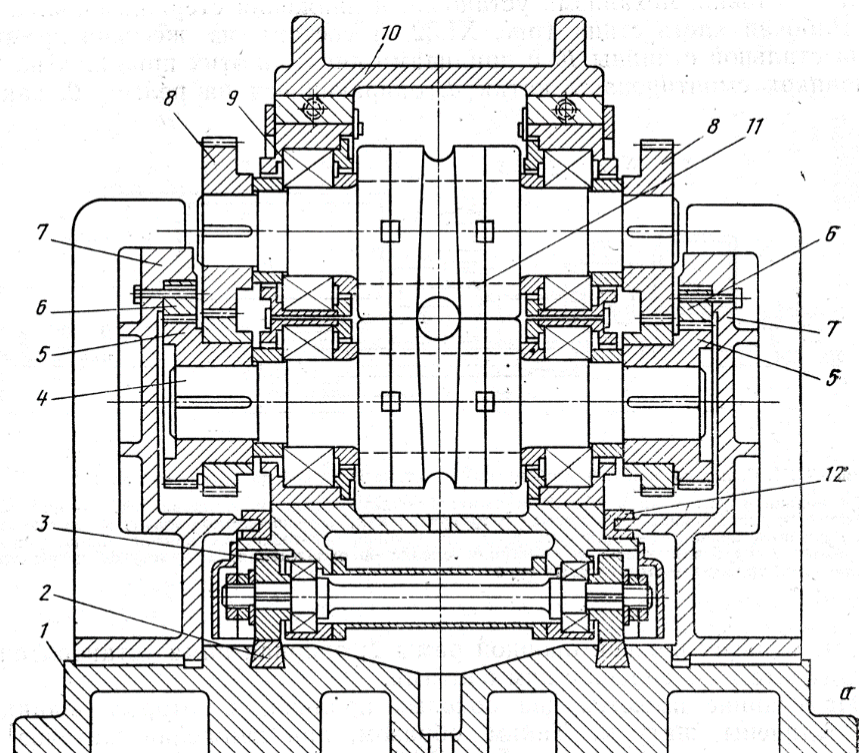


Рис. 1.13. Рабочая клетка стана холодной прокатки труб ХПТ-75.

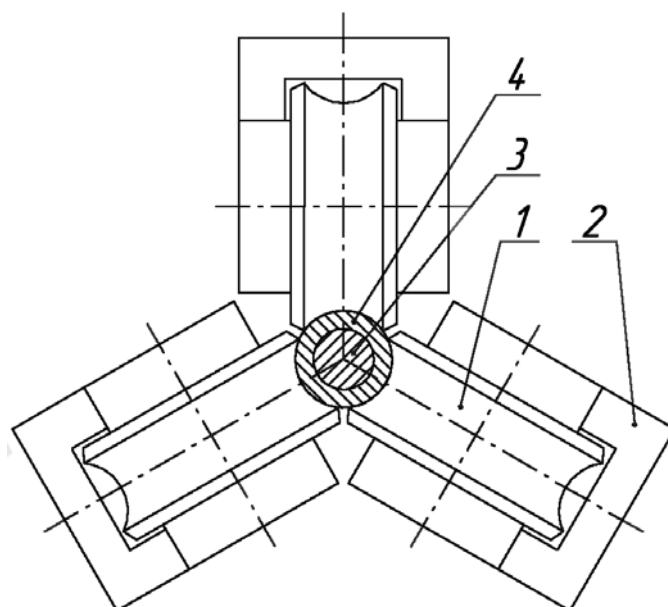


Рис. 1.14. Размещение рабочего инструмента в клетке стана ХПТР:

1 – ролики; 2 – опорные планки; 3 – оправка; 4 – труба.

Прокатка на станах ХПТР. В этом случае процесс периодической прокатки ведется на цилиндрической и постоянной по длине оправке 3 тремя или четырьмя роликами 1, имеющими рабочий ручей круглой формы (рис. 1.14). Ролики опираются своими цапфами на профилированные плашки, перемещаясь по которым поступательно, ролики совершают еще и радиальное перемещение, что позволяет выполнять процесс прокатки трубы 4 на оправке 3. Сортамент профильных труб, получаемых на станах ХПТР, приведен на рис. 12. Достоинством процесса являются: благоприятное в очаге деформации напряженное состояние, что обуславливает возможность получения больших вытяжек и возможность прокатки труднодеформируемых материалов, высокая точность труб и чистота поверхности. Однако получение труб с высокими профильными ребрами или с большим отличием толщины стенки по периметру затруднительно из-за особенностей течения металла. Подвижная рабочая клеть 1 (рис. 1.15) содержит круглую станину – трубу 1, в которой расположены рабочие ролики 3, совершающие процесс прокатки. Ролики перекатываются по профильным планкам 4, которые регулируются по высоте клиньями 5. Сборка роликов установлена в сепараторе 6, движущемся внутри трубы с помощью серег 9 регулируемой по длине тягой 10 от качающегося рычага. Привод клетки осуществляется от кривошипно-шатунного механизма. Процесс, как и на станах ХПТ, является периодическим: прокатка трубы, ее подача и поворот происходят циклически [1].

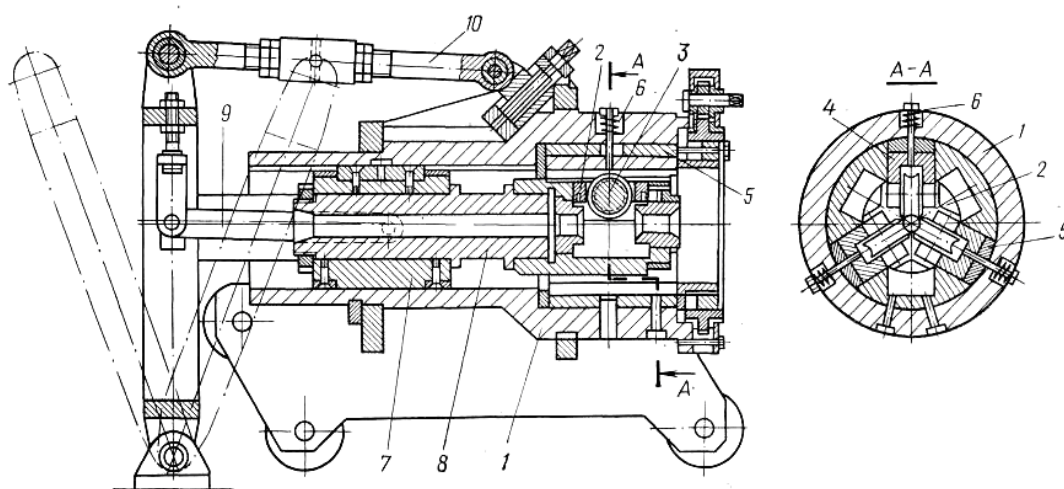


Рис. 1.15. Рабочая клеть стана ХПТР.

Волочение. Волочением называют способ обработки металлов давлением, при котором заготовки протягивают через суживающийся канал волоочильного инструмента с уменьшением поперечного сечения, при этом длина изделия увеличивается. Волоочильный канал может быть образован только одной волокой или сочетанием волоки и оправки. При волочении профильных труб сечение выхода инструмента следует профилировать по заданному сечению трубы, или профильной может быть как волока, так и оправка. Причем последняя при изготовлении профильных труб устанавливается непосредственно на стержне (рис. 1.16, а) или движется вместе с трубой (рис. 1.16, б). В этом случае оправка имеет длину, равную длине вышедшей из волоки трубы.

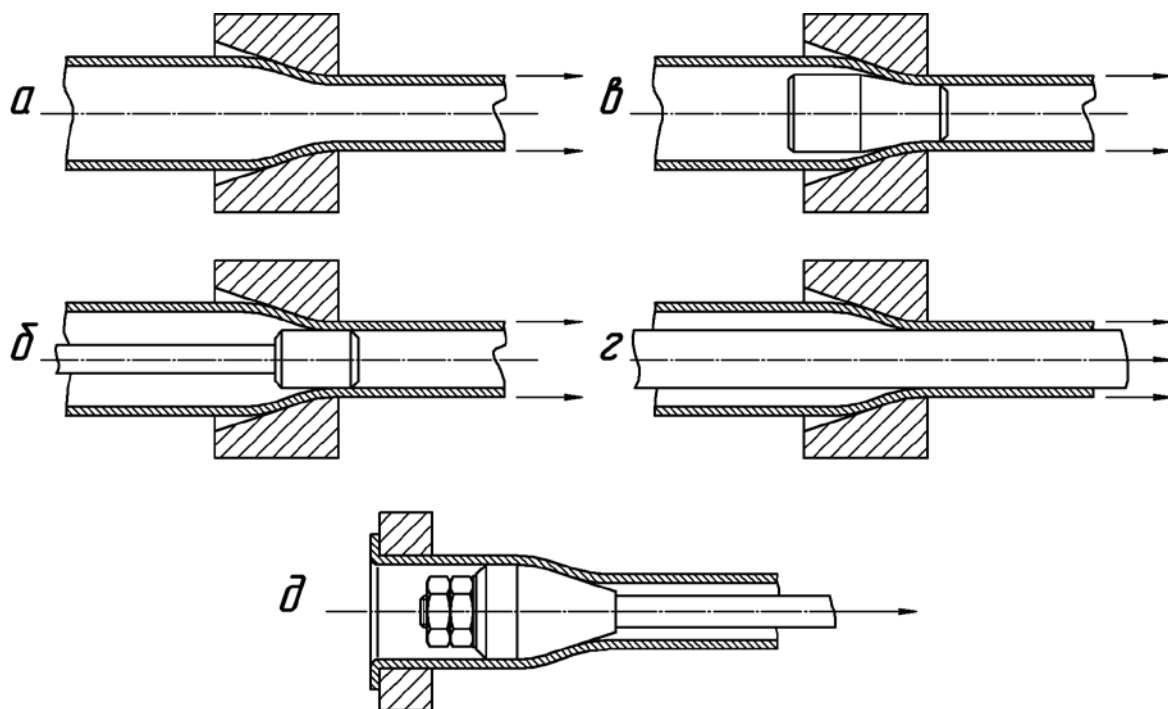


Рис. 1.16. Схемы волочения труб: а – без оправки, б – на неподвижной оправке, в – на самоустанавливающейся оправке, г – на подвижной оправке, д – раздача.

К достоинствам процесса волочения следует отнести достаточно высокую скорость процесса, а также относительную простоту рабочего инструмента (волоки и оправки) в сравнении с рабочими валками (при прокатке) или матрицами (при прессовании). Это достоинство является особенно значимым при необходимости изготовления малых партий труб с переменной толщиной стенки и ограничением времени исполнения заказа.

Действительно, изготовление нескольких фасонных валок с применением, например, аддитивной технологии может быть выполнено в достаточно короткие сроки. Кроме того, по указанным выше причинам процесс волочения мобилен, т.е. может быть быстро перенастроен на производство другого типоразмера труб.

Недостатки состоят в относительно невысоких возможных вытяжках, обусловленных ограничением прочности переднего конца выходящей из волоки трубы и наличием значительных сил трения по контактным поверхностям «труба-волока» и «труба-оправка». Необходима заковка перед волочением переднего конца трубы и его удаление после волочения. Процесс волочения требует применения эффективных технологических смазок для надежного разделения контактных поверхностей в очаге деформации.

Сортамент труб с переменной толщиной стенки, получаемых волочением, приведен на рис. 1.17. Значительную часть всего сортамента составляют трубы, имеющие в составе правильные многоугольники (рис. 1.17, а). На некоторые из таких труб имеются стандарты. Так, восьмигранные трубы с круглым отверстием поставляются по ГОСТ 8633-57, квадратные с круглым отверстием — 19804.3-80, шестигранные с круглым отверстием — ГОСТ 8652-57, круглые с шестигранным отверстием — ГОСТ 8641-57. Имеются такие трубы: прямоугольные с круглым отверстием по ТУ 48-21-75-85 (применяются в турбогенераторах). Плавниковые трубы изготавливают горячей и холодной прокаткой, прессованием и волочением. Некоторые технологические аспекты процесса производства ТПТС рассмотрены в работе [9]. Волочением возможно изготавливать трубы с криволинейным профилем (рис. 1.17, б).

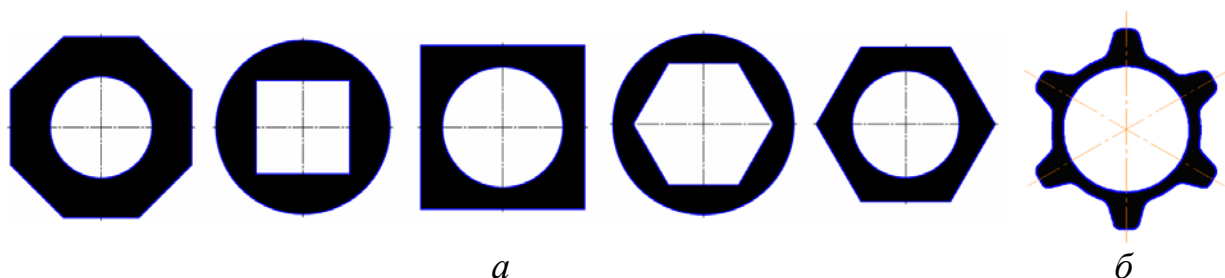
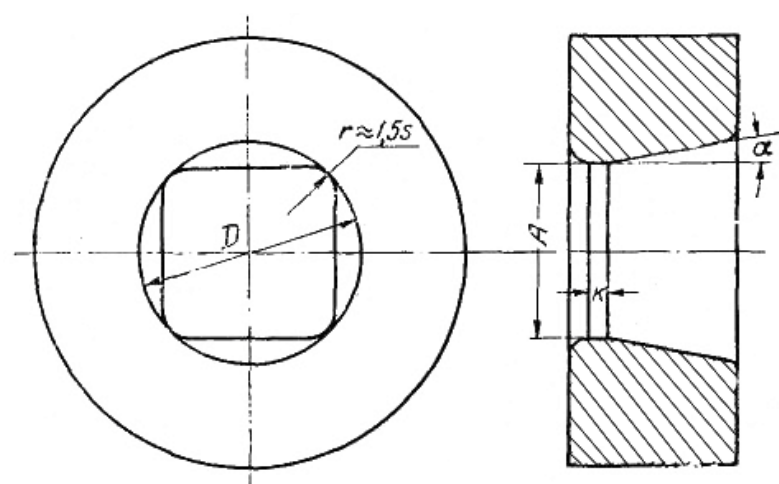
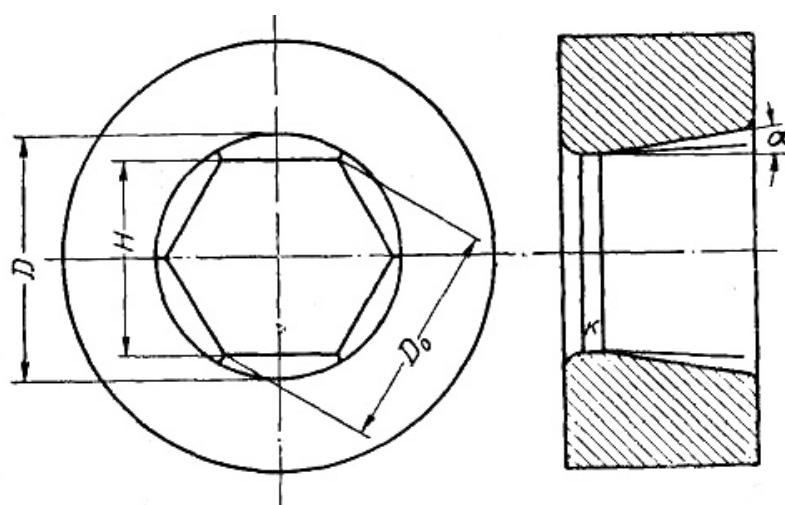


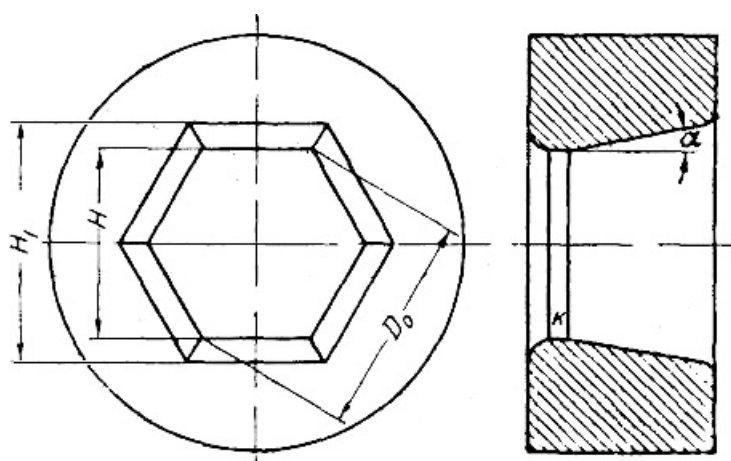
Рис. 1.17. Трубы с переменной по сечению толщиной стенки: а – контуры сечений правильные многоугольники; б – пример криволинейного профиля.



а



б



в

Рис. 1.18. Калибровка волок для профилирования труб: а – квадратных, б – шестигранных при безправочном волочении, в – шестигранных при оправочном волочении.

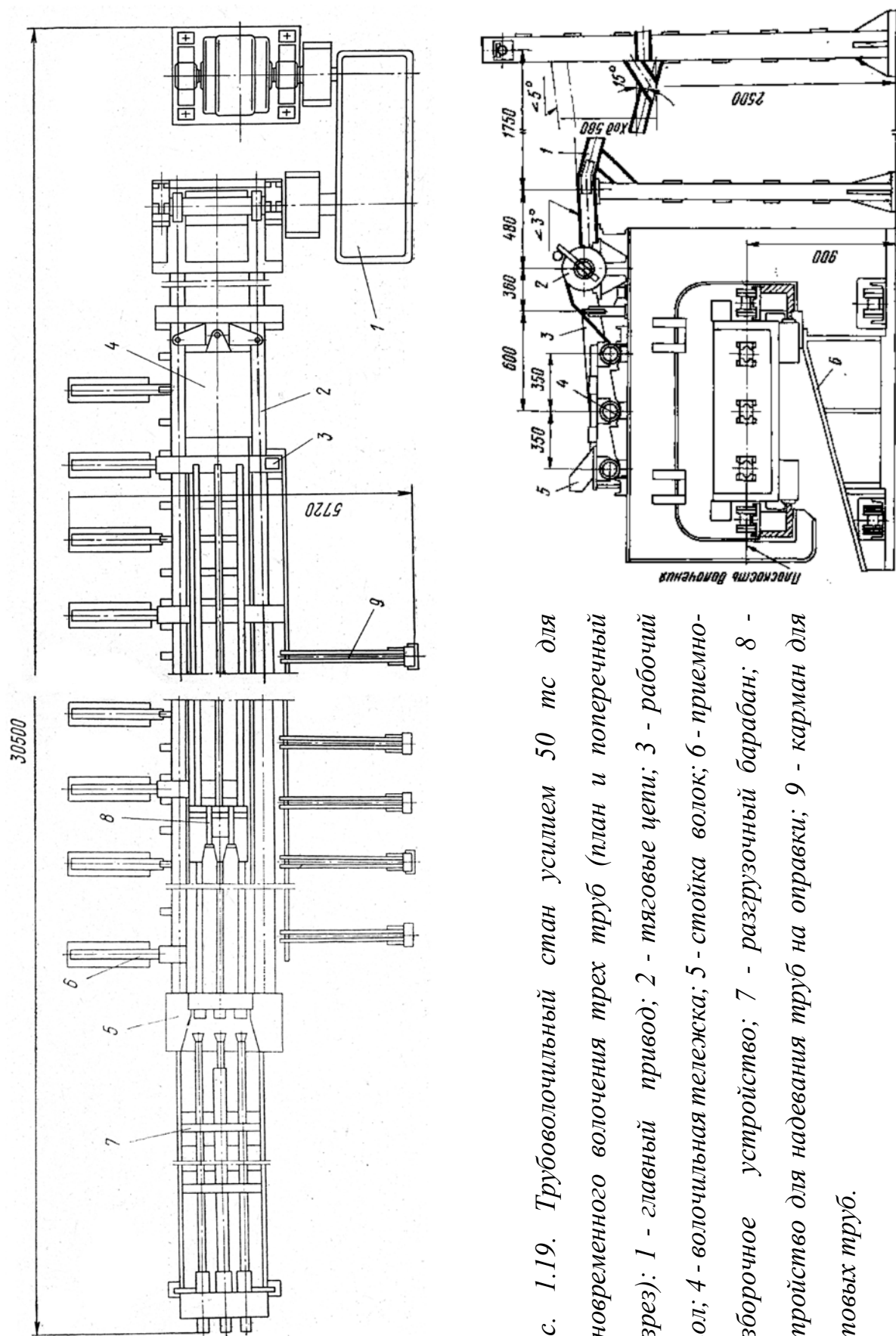


Рис. 1.19. Трубоволоочильный стан усилием 50 тс для одновременного волочения трех труб (план и поперечный разрез): 1 - главный привод; 2 - тяговые цепи; 3 - рабочий стол; 4 - волоочильная тележка; 5 - стойка волок; 6 - приемно-разборочное устройство; 7 - разгрузочный барабан; 8 - устройство для надевания труб на оправки; 9 - карман для готовых труб.

Калибровка профильных волок приведена на рис 1.18.

Волочением на подвижной оправке возможно получение ТПТС, имеющих диаметр трубы более 15 мм. Изготовление труб меньшего диаметра невозможно по условию прочности стержня оправки. Поэтому волочение труб малых диаметров следует производить на подвижной оправке.

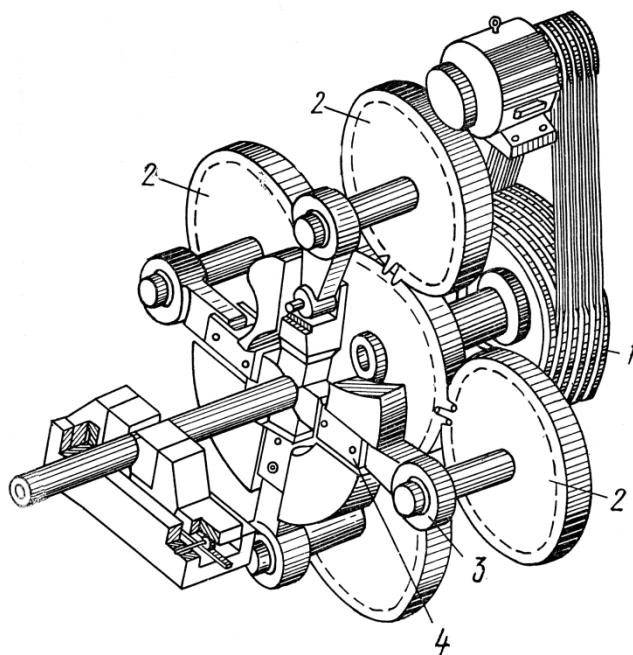


Рис. 1.20. Схема радиально-ковочной машины с шатунно-эксцентриковым приводом.

Методы определения тягового усилия волочения для труб с переменной толщиной стенки практически не разработаны. Но усилие волочения определяет единичную вытяжку, прочность выходящего из волоки участка трубы и надежность (безобрывность) процесса волочения.

Как известно, все материалы по своей способности к обработке давлением можно разделить на две группы: труднодеформируемые и материалы, обработка которых трудностей не вызывает. Эти особенности определяются:

- величиной сопротивления деформации и также интенсивностью упрочнения в зависимости от степени деформации;

- наличием технологической смазки, позволяющей надежно разделить трущиеся контактные поверхности рабочего инструмента и обрабатываемого изделия.

Для труб, обработка которых производится путем холодного волочения на неподвижной оправке, эти особенности весьма существенны.

Труднодеформируемые материалы имеют значительное сопротивление деформации и интенсивно упрочняются. Они, как правило, пассивны к смазкам и имеют высокий коэффициент трения.

Известный из литературы [10] волочильный инструмент для однопроходной деформации показан на рис. 1.19. Рассмотрим конструкцию [1] высокопроизводительного волочильного стана, предназначенного для волочения труб с диаметром 20...80 мм, длиной 4–13 м, имеющих стенку толщиной 1...12 мм. Волочение проводят на неподвижной или самоустанавливающейся оправке, а также возможно безоправочное волочение. Стан может работать в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режиме, причем волочение может осуществляться в одну или три нитки.

Главный привод состоит из электродвигателя постоянного тока мощностью 400 кВт, соединенного через муфты с трехступенчатым цилиндрическим редуктором и ведущих звездочек. Тяговые цепи выполнены в виде замкнутого контура, верхние ветви цепей помещаются на балках рабочего стола, а нижние — в желобах под наклонным склизом. Система питания электродвигателя позволяет плавно регулировать скорость волочения.

Циклограмма работы механизмов стана построена таким образом, что время возврата волочильной тележки почти полностью перекрывает, даже при предельных длинах труб, время их переноса на ось волочения. Волочильная тележка соединена с волочильными цепями при помощи уравнивающего рычага, который подпружинен в направлении волочения. Для исключения несинхронности срабатывания захватывающих плашек каждая пара плашек

приводится в движение от пневмоцилиндра через траверсу, имеющую две направляющие. Сжатый воздух в цилиндры подается в момент подхода тележки к стойке волок через специальные устройства. Размыкание захватов тележки производится автоматически после окончания волочения.

Ковка труб. Деформация труб с переменной толщиной стенки может производиться на оправке путем их обработки в ковочной машине (рис. 1.20). Одна из конструкций выполнена следующим образом: от электродвигателя через ременную передачу 1 посредством полого вала приводится во вращение центральное зубчатое колесо, от которого получают вращение четыре симметрично расположенные шестерни 2. На валах этих шестерен установлены эксцентрики 3, от которых приводятся в поступательное движение шатуны 4. На концах шатунов закреплены ковочные бойки, помещенные в прямолинейные направляющие. Эксцентрики шатунов развернуты так, что производится встречное движение бойков в одном диаметральном сечении [11].

В данной работе поставлены задачи (см 1.4) по совершенствованию процессов и инструмента для оправочного волочения труб с переменной по периметру толщиной стенки. Решение этих задач требует комплексного исследования калибровки инструмента, выбора размеров заготовки, изучения напряженно-деформированного состояния металла и др.

Рассмотрим существующие исследования указанных вопросов.

1.2. Методы построения калибровки инструмента, определение размеров заготовки

При разработке процесса профилирования труб с переменной толщиной стенки необходимо решение нескольких задач, в частности, определить размеры заготовки, последовательность формоизменения для получения заданного профиля, определить калибровку инструмента и др.

1.2.1. Построение профиля рабочего инструмента

Следует заметить, что имеется определенная аналогия между процессом волочения сложных точных фасонных сплошных профилей и труб с переменной толщиной стенки. В этой связи рассмотрим имеющиеся к настоящему времени работы, касающиеся получения сплошных изделий волочением, имеющих сложную форму поперечного сечения [12]. Самые общие положения о принципах калибровки фасонных профилей (А. Я. Хейн) утверждают, что контур готового профиля должен вписываться в контур заготовки так, чтобы различие их площадей составляло величину возможной вытяжки и соблюдалось равенство вытяжек, отдельных элементов профиля.

Авторы работ [13] и [14] считают, что профиль следует разбивать на участки, каждый из которых получает пропорциональное относительное обжатие. В работе [15] предложено считать центр тяжести профиля центром деформации. Радиальные линии, проведенные из такого центра до контура профиля, делят поперечное сечение на элементы. Также предложено считать, что равномерная деформация профиля будет достигнута, если каждый из таких элементов получит обжатие, пропорциональное его площади. Указанное деление может быть выполнено, когда центр тяжести сечения находится внутри контура, т.е. для простых профилей.

В работе [16] на этой основе предложены формулы для частного случая профилирования шлицевых валов из круглой заготовки. Как указывают авторы, предложено определять диаметр заготовки D_0 и число проходов n из следующего выражения:

$$D_0 = d \left(\sqrt{\frac{\lambda_D + m - 1}{m}} \right)^n; D_0 = D \lambda_D^n; n = \frac{\ln(D/d)}{\ln(1/\lambda_D) \sqrt{(\lambda_D + m - 1)/m}}, \quad (1.1)$$

где d – диаметр вала по впадинам шлицев;

$m = \frac{k\alpha}{2\pi}$ (α – центральный угол дуги между двумя шлицами,

k – число шлицев,

D и d – диаметр вала по выступам и впадинам шлицев,

λ_D – вытяжка по наружному диаметру шлица.

Другим направлением построения калибровки является применение известного принципа в теории ОМД - закона наименьшего сопротивления, согласно которому сопротивление течению металла в любых направлениях должно быть одинаковым. В зависимости от величины коэффициента внешнего трения могут быть два крайних случая - полного отсутствия или достаточно большого трения. Им соответствуют радиальная или нормальная схемы течения. Если выполнить осадку образца, имеющего форму искомого профиля, для которого строится калибровка, то в соответствии с упомянутым законом в результате получим новый профиль. Частицы металла будут двигаться по линиям наименьшего сопротивления, и дополнительные перемещения металла между отдельными частями профиля будут отсутствовать, что подтверждается на практике.

В работе [17] предложено для построения контуров переходных сечений и определения размеров и формы заготовки использовать метод осадки темплета постоянной толщины, имеющего форму готового профиля, изготовленного из пластической массы. Этот темплет осаживают между двумя параллельными плитами на величину предполагаемой вытяжки. Сечение темплета, изменяясь, стремится к кругу, и таким образом по ступеням осадки возникает все более простой профиль в соответствии с правилом наименьшего периметра. Число осадок должно быть равно числу переходов волочения. Поскольку изменение формы зависит от взаимного влияния отдельных элементов при их совместной осадке, то получаемые промежуточные контуры переходов будут характеризоваться минимумом энергетических затрат при волочении.

Следует отметить, что вследствие действия закона наименьшего сопротивления сечения разделятся на части, определяемые положением нейтральных линий. Используя это обстоятельство, в статье Г. Прейслера, посвященной калибровке холоднотянутых профилей, предложен метод,

использующий деление всего сечения нейтральными линиями. Построение калибровки, следуя этому методу, выглядит так:

1. Вычерчивают профиль, который необходимо получить;
2. Наносят нейтральные линии, представляющие геометрическое место точек, равноудаленных от двух совместно рассматриваемых участков профиля. Эти линии делят профиль на зоны (рис. 1.21);
3. Для каждой зоны строят припуск, пропорциональный расстоянию от нейтральной линии до контура. Этот контур является идеальным переходным сечением;
4. Полученный идеальный контур корректируют, упрощают до приемлемого;
5. В результате нескольких подобных операций форма упрощается настолько, что возможна замена одного из них кругом или квадратом.

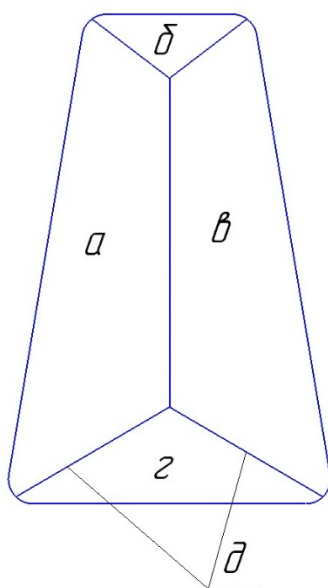


Рис. 1.21. Торец прутка профиля после его разрыва при волочении: зоны течения металла (а-г), нейтральные линии (д).

В итоге метод требует больших затрат времени. Учитывая это, автор метода рекомендовал при построении всех контуров переходных сечений пользоваться зонами, образованными нейтральными линиями в готовом продукте, что снижает точность этого метода. Для исключения этого недостатка в работе [18] предложены формулы для определения величин

абсолютного обжатия. В частности, на выпуклых участках абсолютное обжатие:

$$\Delta R = \sqrt{(\rho - R)^2 + \lambda(2\rho - R)R} - \rho, \quad (1.2)$$

где ρ – радиус кривизны;

R – расстояние от нейтральной линии до контура профиля, измеренное по нормали;

λ – вытяжка.

На прямолинейных участках:

$$\Delta R = (\lambda - 1)R. \quad (1.3)$$

На вогнутых участках:

$$\Delta R = \rho - \sqrt{(\rho - R)^2 + \lambda R(2\rho + R)}. \quad (1.4)$$

И. Л. Перлин [19] утверждает, что процесс волочения некруглых сплошных профилей (треугольников, квадратов, шестигранников и др.) протекает наиболее успешно, если форма исходной заготовки подобна форме готового профиля. При этом можно получить изделие с минимальной по сечению неравномерностью деформации. Упомянутую подобную форму заготовки можно получить заранее путем прокатки или прессования. Однако при этом часто отсутствует геометрическое подобие форм поперечного сечения и готового изделия. Но в таком случае если наклоны всех образующих контактной поверхности инструмента к оси волочения одинаковы, то неизбежно различие длин контактной поверхности на разных участках зоны деформации, а граница входа заготовки в канал не лежит в одной плоскости. Тогда изделие может отличаться заметными дефектами и следует отказаться от сохранения одинакового угла профиля волочильного канала на разных участках.

Следует также иметь в виду, что при наличии острых кромок профиля возможно появление трещин. При снижении дробности деформации эта возможность уменьшается. Следовательно, при построении калибровок данное обстоятельство следует учитывать.

Весьма эффективный графический метод разработан В. В. Зверевым [19], который состоит в следующем:

1. Выбирают заготовку одной из простейших форм с учетом необходимой при волочении степени деформации;
2. Перемещают контур готового профиля внутри контура заготовки из условия максимально возможного равенства объемов металла, расположенных в каждой координатной плоскости, оси которых проходят через центр тяжести заготовки;
3. На контуре заготовки на равных расстояниях — симметрично к главным осям готового профиля и заготовки — наносят точки, через которые проводят наименьшие по длине и ортогональные к обоим контурам плавные линии (линии тока);
4. Назначают среднюю вытяжку и находят число переходов;
5. Полученные отрезки между контурами заготовки и готового профиля делят на части, пропорциональные разностям квадратных корней площадей начального, промежуточного и конечного сечений профиля по переходам. Таким образом линии тока оказываются разделены на число отрезков, равное числу переходов;
6. Соединяют полученные на линиях тока и относящиеся к одному проходу точки плавными кривыми, ортогонально к линиям тока. Эти кривые называют эквипотенциалами. Полученное семейство замкнутых кривых представляет собой калибровку волок. Далее контуры можно упростить, планиметрировать или даже корректировать в соответствии с нужной системой вытяжек.

Вместе с тем рассмотренный метод не позволяет решить ряд следующих вопросов [12]: выбор такой формы и размеров заготовки, которые бы обеспечили минимальное искривление линий тока, малая точность при позиционировании на чертеже взаимного расположения контура заготовки и готового профиля. Субъективные ошибки, которые возможны при построении линий тока и эквипотенциалей.

В работах Г. Я. Гуна [20, 21] предложен другой расчетно-графический метод в предположении, что форма, размеры и расположение заготовки относительно готового профиля заданы. В качестве примера, иллюстрирующего этот метод, рассмотрено получение четырехшлицевого вала и круглой заготовки, центры которых совпадают. Принята следующая система координат: z — продольная ось в изделиях, оси x и y — лежат в плоскости, перпендикулярной оси z . Проекции сечений контактной поверхности очага деформации плоскостями $z=const$ представляют собой семейство замкнутых кривых $z = \varphi(x, y)$. При этом боковая поверхность находится в виде:

$$S = \iint_D \left(x; y; z; \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) dx dy . \quad (1.5)$$

Предложено функцию φ находить из условия минимума контактной поверхности S с использованием функционала. Г. Я. Гун составил уравнение Эйлера для этого функционала и в результате получил:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 . \quad (1.6)$$

В итоге функция φ удовлетворяет уравнению Лапласа, следует также учесть граничные условия, определяемые значением функции φ при $z=0$ и $z=l$.

Получаемое семейство эквипотенциальных кривых $\varphi(x, y) = const$ содержит все возможные контуры промежуточных сечений, которые можно построить с помощью конформных отображений, методом сеток или электродинамический аналогий [22].

Набор эквипотенциалей при различных значениях z позволяет определять также и продольный профиль очага деформации или набор валок для реализации всего маршрута волочения. Важно также знать длину очага деформации $l_{од}$ и угол наклона α рабочего инструмента к оси волочения.

Вместе с тем метод Г. Я. Гуна, также, как и метод В. В. Зверева, не дает возможности определить форму и размеры заготовки и не позволяет решить

вопрос о расположении контура готового профиля относительно контура заготовки.

Моделирование путем использования аналогии основано на воспроизведении физического явления, отличного по природе, но которое описывается аналогичными уравнениями. Так, в работе [11] предложено использовать для решения уравнения Лапласа электрическую аналогию. С этой целью записан закон Ома в дифференциальной форме:

$$i_x = -c \frac{\partial U}{\partial x}; i_y = -c \frac{\partial U}{\partial y}; i_z = -c \frac{\partial U}{\partial z}; \quad (1.7)$$

где i – плотность тока; U – электрический потенциал; c – коэффициент электропроводности.

Закон Кирхгофа представлен в виде:

$$\frac{\partial i_x}{\partial x} + \frac{\partial i_y}{\partial y} + \frac{\partial i_z}{\partial z} = 0. \quad (1.8)$$

Подстановка (1.17) в (1.18) дает уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1.9)$$

Тогда если область течения электрического тока геометрически подобна области течения жидкости, а граничные условия аналогичны, то интегралы уравнений Лапласа для этих областей отличаются произвольными постоянными, т.е.:

$$U(x, y, z) = k_\varphi \varphi(x, y, z) + c. \quad (1.10)$$

Эквипотенциали электрического поля соответствуют эквипотенциалам течения жидкости, т.е.:

$$\varphi(x, y) = k_\varphi \varphi(x, y) + c. \quad (1.11)$$

На этом основании в работе [12] разработано автоматическое устройство для построения калибровки (АУПК), а само устройство приведено в работе [23]. Устройство предназначено для моделирования решения уравнения Лапласа в области, ограниченной контурами заготовки и готового профиля, т.е. для построения линий равного потенциала ($\varphi = const$). Построение таких линий осуществляется автоматически в соответствии с заданным значением

потенциала, одновременно происходит измерение площади, ограниченной вновь построенного потенциала. В результате экспериментов на АУПК показано, что эквипотенциали, упрощаясь, очень скоро становятся концентрическими окружностями, а профиль любой формы создает поле, аналогичное полю точечного источника.

Следует заметить, что большинство методов калибровки не предусматривает определение размеров и формы заготовки. Построение калибровки по методам, основанным на законе наименьшего сопротивления [17] в конечном счете приводит к определению размеров заготовки и ее положения относительно готового профиля.

Оборудование для производства специальных фасонных профилей рассмотрено в работе [24].

1.2.2. Определение параметров заготовки для волочения

В работах [8, 25] на основании многочисленных экспериментов и математической обработки их результатов предложены формулы по определению толщины стенки заготовки, исходя из размеров получаемых профильных труб, которые справедливы в пределах границ проведенных экспериментов. На этой основе в работе В. Н. Данченко и др. [8] разработана методика определения размеров заготовки для случаев волочения сечений с правильными многоугольниками, а также построения калибровки рабочего инструмента. Согласно этой методике после расчета параметров заготовки на основе принимаемого значения вытяжки во втором переходе волочения вычисляется площадь поперечного сечения промежуточного профиля, по эмпирическим формулам определяются радиусы закругления ребер профиля, а грани профиля волоки принимаются прямолинейными. Такой подход не учитывает фактического течения металла, определяемого линиями тока и соответствующими им эквипотенциалами. Авторами также не рассмотрены случаи волочения профилей, имеющих сечения криволинейной формы.

Значительный интерес представляет определение длины очага деформации и угла конусности волокна. В работе [12] эта задача решена следующим образом. За основу взята формула А. А. Поздеева для определения усилия волочения сплошного профиля:

$$P = p\Delta S + pfF + 0,77\sigma_{\phi}S_1\alpha, \quad (1.12)$$

где p – среднее удельное давление на контакте волокна – металл; ΔS – площадь проекции поверхности трубки тока, ограниченной входом и выходом; f – коэффициент контактного трения; σ_{ϕ} – фактическое сопротивление формоизменению; α – угол конусности волокна.

После дифференцирования $\partial P/\partial \alpha$ найдена оптимальная длина контакта, оптимальный угол конусности α и построена необходимая номограмма для определения этих величин.

1.3. Методы теоретического исследования механики очага деформации

1.3.1. Определение напряженно-деформированного состояния металла

При определении существующих теоретических исследований следует выделить два основных момента — это методы исследования и объекты исследования. Что касается методов исследования напряженно-деформированного состояния, то следует отметить такие методы: линий скольжения, «инженерный» метод, энергетический, сопротивления металлов пластическим деформациям и вариационный метод.

Метод линий скольжения, изложенный в работах П. Хилла, В.В. Соколовского [26, 27], позволяющий упростить уравнения равновесия, получил дальнейшее развитие в работах А. Д. Томленова [28], который, основываясь на уравнении равновесия общего вида, предложил метод характеристик. Однако в этих случаях не рассматривается процесс формоизменения при пластической деформации. Для решения такой задачи может быть использован метод сопротивления металлов пластическим деформациям. Основа метода — это совместное решение дифференциальных уравнений равновесия и зависимостей связи напряжений и деформации, развитый Г.А. Смирновым-Аляевым [29-31].

В «инженерном» методе рассматриваются упрощенные уравнения равновесия совместно с условием пластичности [32-34]. Здесь следует отметить работы А. Л. Перлина, М. З. Ерманка [19], которые получили расчетные формулы для нескольких процессов волочения. Этим методом В.Я. Шапиро [35] исследовал, например, процесс бухтового волочения труб на самоустанавливающейся оправке, а в работе [19] изучены процессы оправочного и безоправочного волочения полых и сплошных профилей.

Энергетический метод для нестационарных процессов ОМД применен в виде «баланса работ», а для стационарных процессов - в виде «баланса мощностей» в работах В. Н. Выдрина [36], М. В. Сторожева [37], а для оправочного волочения — в работах Шевченко и др. [38].

Вариационный метод развит в работах И. Я. Тарновского [39], Г. Я. Гуна и др. [21, 40], А. А. Поздеева, В. С. Колмогорова [39, 41]. При этом определяемые параметры (напряжения, деформации) записаны в виде функций с варьируемыми параметрами, а из условия минимума вариационного уравнения принципов Лагранжа или Кастильяно определяются искомые величины. Использование прямого метода Ритца можно получить решения и для объемных задач.

Среди объектов исследования напряженно-деформированного состояния и определения деформирующего усилия при волочении в упомянутых выше работах изучено волочение тонкой полосы, некруглых и круглых (пруток, проволока) сплошных профилей (например, прямоугольных), а также волочение труб круглого сечения без оправки и на оправках различного типа при различных случаях приложения рабочих нагрузок (волочение, проталкивание, приложение противонапряжения и др.). При этом определялось в основном усилие волочения. Необходимо отметить, что известные задачи исследовали плоскую или осесимметричную расчетные схемы.

В последнее время возросли требования к показателям качества изделий, получаемых методами ОМД: точности размеров, поврежденности металла,

снижению неравномерности деформации по сечению и др. Следовательно, встали задачи находить локальные распределения деформаций, напряжений, гидростатического давления, поврежденности металла и необходимо использование методов, позволяющих выполнить такие решения.

Кроме того, при волочении профильных труб с переменной по периметру толщиной стенки расчетная схема очага деформации имеет несколько плоскостей симметрии, является объемной и не может быть сведена к плоской или осесимметричной схемам.

1.3.2. Усилие волочения профильных труб с переменной толщиной стенки

Расчет продольного напряжения и усилия волочения необходим для обоснованного построения маршрутов волочения, определения допустимой вытяжки за переход и запаса прочности переднего конца протягиваемой трубы, а также для выбора типоразмера волочильного стана. В настоящее время известно большое количество формул по определению усилия волочения сплошных круглых и фасонных профилей, а также волочению круглых и профильных труб без оправки и на оправках различного типа (неподвижных, подвижных или самоустанавливающихся). Эти зависимости получены в работах А. И. Целикова, А. А. Королева, Л. Е. Альшевского, Е. Зибеля, М. М. Бернштейна, В. А. Кочкина, и др. [42-47].

Среди основных методов решения этих задач наиболее известны следующие:

1. Составление уравнений равновесия, которые дополняются условием пластичности;
2. Метод энергетического баланса.

Широкий круг задач по определению усилия волочения рассмотрен в монографии И. Л. Перлина и М. З. Ерманка [19]. В частности, определено усилие при волочении из круглой заготовки сплошных круглых и фасонных профилей, волочении круглых и профильных труб без оправки, а также неподвижной, подвижной и самоустанавливающейся оправках. Эти работы

базируются на методе составления уравнений равновесия, которые дополняются условием пластичности. В частности, для сплошных круглых прутков определение продольного напряжения волочения выполняется следующим образом. Рассматривают осесимметричную задачу. Устанавливают связь между главными радиальными и нормальными напряжениями на контактной поверхности, определяют сумму проекций продольных сил, действующих на контактной поверхности равных радиальных напряжений на ось волочильного канала и записывают приближенное условие пластичности. Интегрируя полученные уравнения в пределах геометрического очага деформации с учетом граничных условий, находят продольные напряжения волочения.

При изучении волочения сплошных некруглых прутков схема не является осесимметричной. Следовательно, деформированное и напряженное состояние металла в деформационной зоне усложняется. Появляются дополнительные деформации, которые определяются формами начального и конечного поперечных сечений. Становятся неодинаковыми в пределах каждого элементарного объема нормальные напряжения и др. В этой связи в работе [19] рассматриваются отдельно правильные многоугольники, прямоугольники и близкие к ним сечения. Например, для правильных многоугольников предлагается увеличение контактной поверхности очага деформации учитывать по методу увеличенного коэффициента внешнего трения, вводя коэффициент A из соотношения:

$$A = \frac{F_{к пр}}{F_{к кр}}, \quad (1.13)$$

где $F_{к пр}$ - контактная поверхность, образующаяся при волочении профиля заданной формы; $F_{к кр}$ - то же при волочении равновеликого круга.

Для упрощения расчетов это отношение может быть заменено отношением средних периметров данного профиля к периметру равновеликого круга:

$$A = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{P_H}{\sqrt{F_H}} + \frac{P_K}{\sqrt{F_K}} \right), \quad (1.14)$$

где P_H и P_K - начальный и конечный периметры заданного профиля.

При волочении правильных многоугольников из заготовок подобной им формы в случаях использования катаной или прессованной заготовки, а также при ведении многопереходного процесса может быть применен метод равных контактных поверхностей.

Для определения напряжения волочения профилей с поперечными сечениями, близким к круглым, использована формула:

$$\sigma_{в пр} = \sigma_{ср} \frac{F_{оп}}{F_K}, \quad (1.15)$$

где $\sigma_{в пр}$ – напряжение волочения заданного профиля;

$\sigma_{ср}$ - то же для сравниваемого круглого профиля;

$F_{оп}$ - сечение круга, описанного около профиля;

F_K - сечение заданного профиля.

Для прямоугольных профилей учет особенностей формы профиля ведется на основе метода описанного прямоугольника. Для профилей сплошных форм Г. Я. Гун [21] предложил формулу, основанную на теории течения идеальной жидкости:

$$\sigma_{в} = \beta \sigma_{тс} \left(1 + f_n \frac{Pl_{п.з.}}{F_H - F_K} \right) \ln \frac{F_H}{F_K}, \quad (1.16)$$

где β - коэффициент Лоде;

P - полусумма начального и конечного контактных периметров профиля;

$l_{п.з.}$ - длина пластической зоны.

При расчете силы волочения круглой трубы на неподвижной оправке принимают [19]:

1. Значение силы волочения круглой трубы на неподвижной оправке приблизительно равно значению силы волочения соответственного круглого сплошного профиля, увеличенного на силу трения, которая возникает на поверхности оправки.

2. Увеличение сил трения учитывают, повышая коэффициент внешнего трения, причем такое повышение принимают пропорциональным отношению контактной поверхности трубы на оправке контактной поверхности сплошного профиля по формуле:

$$A = 1 + \frac{d_k \cos \alpha}{d_k + t_n + t_k}, \quad (1.17)$$

где d_k - диаметр оправки;

t_n и t_k - толщина стенки трубы на входе и на выходе зоны обжатия стенки.

3. Предложенная формула для коэффициента A весьма верно отражает существо процесса. Действительно, если t_n и t_k соответствуют случаю толстостенной трубы, то значения A ближе к единице, что соответствует волочению прутка, и наоборот, если t_n и t_k соответствуют волочению тонкостенной трубы, у которой контактная поверхность более развита, то коэффициент A растет.

4. Удельные силы трения на волоке и оправке равны.

В результате на основе формулы по определению напряжения волочения сплошных круглых профилей получена зависимость напряжения волочения круглых труб на неподвижной цилиндрической оправке (в наших обозначениях):

$$\sigma_{в оп} = 1,1 \sigma_{с ср} \left(1 + \frac{tg \alpha_n}{A f_n} \right) \left[1 - \left(\frac{F_k}{F_{к ос}} \right)^{\frac{A f_n}{tg \alpha_n}} \right], \quad (1.18)$$

где $\sigma_{с ср}$ - среднее по очагу сопротивление деформации;

α_n - приведенный угол волоки;

F_k и $F_{к ос}$ - конечная площадь поперечного сечения трубы в конце зоны обжатия и в конце зоны осаживания по диаметру соответственно.

Волочение труб на подвижной оправке отличается от процесса волочения на неподвижной оправке тем, что силы контактного трения на оправке направлены в сторону волочения трубы и способствуют продвижению металла через волок. Поэтому в работе [19] предложено учесть

это обстоятельство путем изменения знаков тех членов формул, которые учитывают силы трения, возникающие в металле от воздействия оправки. Тогда в формуле (1.17) предложено перед вторым слагаемым поменять знак с плюса на минус.

В известной литературе – в работах И. Л. Перлина, В. Л. Колмогорова, С. В. Паршина [19, 39, 48] - найдены также решения поставленной выше задачи для случаев профилирования труб путем изгиба стенки без изменения по периметру ее толщины.

В общем случае для анализа процесса волочения необходимо нахождение в отдельности составляющих полного усилия волочения, таких как сила контактного трения на границе металл-инструмент, сила, необходимая для пластической деформации объема металла, и сила, необходимая для деформации металла во внеконтактных зонах очага деформации.

Эти составляющие могут быть найдены с использованием метода энергетического баланса процесса. На основе метода энергетического баланса полной мощности пластической деформации решены, например, задачи осадки с кручением [49], безоправочного и оправочного волочения труб [38], волочения плоских полос [50], а также при изучении процесса горячего редуцирования труб [51] и др.

Подводя итог, отметим, что определение усилия волочения труб с переменной толщиной стенки на оправке к настоящему времени не получило необходимого решения.

Из известных работ, посвященных изучению деформации профильных труб, следует отметить работы С. В. Паршина [48], Н. В. Семеновой [52], Р. А. Окулова [53], Е. В. Шоковой [54]. Эти работы касаются различных аспектов исследования профильных труб, которые могут быть получены волочением без оправки путем изгиба стенки. А. И. Дорохов [9] занимался изучением процесса изготовления профильных труб с переменной толщиной стенки, а В. Н. Данченко, В. В. Сергеев, Э. В. Никулин [8] разработали методику

определения параметров технологического инструмента (волока и оправок). Особенности производства профильных труб рассмотрены в работе [55].

Таким образом, задача определения напряженно-деформированного состояния при оправочном волочении профильных труб с переменной по периметру толщиной стенки до настоящего времени недостаточно исследована, а упомянутые выше методы не могут быть применены.

В известных источниках разработан и широко используется метод конечных элементов, который позволяет решать поставленные в данной работе задачи. Преимуществами метода конечных элементов является возможность определения локальных характеристик очага деформации, включая характер течения металла, напряжения, деформации, и поврежденность металла, а также и контактные давления металла на инструмент и энергосиловые параметры процесса в задачах, когда область деформирования — произвольной трехмерной формы с учетом сил контактного трения, упрочнением материала, и неравномерностью распределения механических свойств. Эти преимущества в настоящее время нашли многократные подтверждения в работах [55, 56].

1.4. Постановка задач исследования

Проведенный выше анализ позволил установить, что для изготовления профильных труб ТПТС определенного класса возможен выбор размеров заготовки. Вместе с тем необходима разработка автоматизированной системы расчетов, основанной на использовании ПВМ и позволяющей оперативное их выполнение при учете поставки трубной заготовки по действующим ГОСТам, либо определять необходимость предварительной их калибровки.

Такая система должна быть достаточно универсальной для того, чтобы проектировать переходы волочения и конфигурацию рабочего инструмента как для сечений, содержащих правильные многоугольники, так и для волочения криволинейных профилей.

В настоящее время известны способы построения линий тока деформируемого металла при производстве сплошных профилей и

определения эквипотенциалей при профилировании, основанные на «ручном» их выполнении, либо на расчетах с применением аналогов. Построение упомянутых выше кривых возможно на основе использования САПР с применением описания линиями наименьшей кривизны — сплайнами.

Установлено, что не существует обоснованных моделей процесса профилирования ТПТС, которые позволяют произвести определение локальных характеристик напряженно-деформированного состояния и уточнить значения энергосиловых параметров процесса. В настоящее время отсутствуют методики расчета параметров напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла, которые необходимы для правильного построения маршрутов волочения, не известны исследования, позволяющие определять формоизменение труб (особенно заполнение углов профиля при малых радиусах сопряжения граней) и контактное давление металла на инструмент, что особенно необходимо, поскольку при волочении среднего и большого диаметра рабочий инструмент может быть изготовлен из стали.

Основываясь на вышеизложенном, сформулировали цели настоящей работы:

1. Разработать автоматизированную систему определения размеров заготовки, позволяющую учитывать форму и размеры готовой трубы, выбирать эти размеры с учетом существующих ГОСТов на круглые трубы, либо производить заготовительное волочение с целью получения необходимых размеров заготовки. Такие расчеты необходимо выполнять как для ТПТС, имеющих в составе поперечного сечения правильные многоугольники, так и имеющие криволинейный профиль.
2. Совершенствовать методику определения линий тока и эквипотенциалей при деформировании ТПТС и определять на этой основе калибровку профильных волок и оправок.
3. 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.

4. На основе разработанных моделей провести исследования, включающие определение напряженно-деформированного состояния материала трубы в очаге деформации, поврежденность металла и энергосиловые параметры процесса.
5. Определить влияние параметров процесса волочения, в частности способа приложения технологического усилия, конфигурации готовой трубы, параметров заготовки и величины коэффициента трения на форму готовой трубы, в частности на заполнение углов сечения при различных очертаниях получаемого профиля.
6. Построить и проанализировать картину распределения контактных давлений по поверхности рабочего инструмента и деформируемой трубы.
7. Провести экспериментальное исследование процессов при натурном моделировании, в частности оценку адекватности процесса профилирования труб на основе исследования микроструктуры исходных протянутых труб и определения деформированного состояния.
8. Разработать рекомендации по совершенствованию процессов профилирования ТПТС и выбору параметров волочильного инструмента и технологического оборудования.

1.5. Выводы по главе 1

1. К настоящему времени известно большое разнообразие профильных труб с переменной толщиной стенки, форма поперечного сечения которых и определяющие размеры вызывают необходимость выбора наиболее эффективного способа их производства и применяемых для этой цели технологических машин.
2. Процесс волочения в профильной волоке или с использованием профильной оправки позволяет с высокой эффективностью получить трубы с переменной толщиной стенки и профилем, имеющем в своем составе правильные многоугольники или профили с криволинейными очертаниями.
3. На основе анализа установлено, что методы построения калибровки профилей и конфигурации рабочего инструмента для труб с переменной толщиной стенки, имеющих в поперечном сечении правильные многоугольники, разработаны недостаточно, а для криволинейных трубных профилей такие рекомендации отсутствуют.
4. Из известных в литературе аналогов процессов производства труб с переменной толщиной стенки наиболее близкими являются сплошные фасонные профили высокой точности.
5. Определение калибровки и профиля рабочего инструмента весьма эффективно выполнять на основе построения в поперечном сечении труб с переменной толщиной стенки линий тока металла и эквипотенциалей.
6. Геометрия очага деформации при волочении профильных труб с переменной толщиной стенки такова, что теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния наиболее полно может быть проведено лишь на основе конечно-элементного метода.
7. Для постановки задач теоретического исследования необходимо создание комплексной модели, включающей твердотельную геометрическую модель, описание калибровки очага деформации и их конечно-элементный аналог.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Процесс изготовления труб с переменной толщиной стенки состоит в том, что заготовка в виде круглой трубы протягивается в зазоре, образованном неподвижной (или подвижной) оправкой и волокой, причем профильными (не круглыми) могут быть либо оправка (внутреннее профилирование), либо волока (наружное профилирование) [55]. При этом следует решать несколько задач и среди них выбор геометрических моделей процесса, определение необходимых размеров заготовки (наружного диаметра и толщины стенки), определение формы и размеров рабочего инструмента в поперечном и продольном направлениях. Поскольку качество готового изделия определяется такими показателями, как заданные размеры готовой трубы, допустимая техническими условиями неравномерность механических свойств, также накопленная поврежденность металла, то необходимо определять локальные механические характеристики механических переменных очага деформации и, в частности, распределение напряжений и деформации, поврежденность металла и др.

Учитывая, что форма очага деформации не является осесимметричной, то, следовательно, необходим выбор такого метода отыскания упомянутых выше величин, который позволяет определять их локальные характеристики и производить параметрический анализ с целью установления необходимого управления. Комплексная модель, описывающая процесс получения ТПТС, должна содержать следующие составляющие ее модели:

1. Геометрические модели очага деформации для расчета формоизменения, напряженно-деформированного состояния металла, контактного давления на инструмент и др.;
2. Модель расчета калибровки рабочего инструмента;
3. Описание профиля инструмента на основе калибровки;
4. Принятый метод определения Н.Д.С. и расчета поврежденности металла.

Рассмотрим эти составляющие модели и их обоснование.

2.1. Твердотельные модели очага деформации при волочении ТПТС

При изготовлении ТПТС используют круглую трубную заготовку, причем процесс волочения производят с использованием в зависимости от формы готовой трубы с профильной волокой и цилиндрической оправкой, либо гладкой конусной волокой и профильной оправкой, размеры которых в плоскости выхода определяют готовый профиль. Может быть применима неподвижная или подвижная оправка. Очаг деформации имеет 3D форму (рис. 2.1 и 2.2).

Рассмотрим особенности процесса профилирования ТПТС. Со стороны входа трубы в волоку существует зона безоправочного волочения, в которой происходит уменьшение внутреннего диаметра трубы. В рассматриваемых процессах следует принимать зазор между внутренней поверхностью трубы минимальным и зону безоправочного волочения можно не учитывать. Далее металл деформируется между двумя жесткими поверхностями – оправкой и волокой.

Учитывая, что существует два принципиально различных по характеру типов течения металла при деформации класса ТПТС, рассмотрим их отдельно:

1. Трубы с внутренним профилированием, при котором на внутреннем контуре располагают одну или последовательно несколько профильных оправок, которые по переходам уменьшают свое сечение (рис. 1.17). Волоки имеют правильный конический профиль, уменьшающийся от перехода к переходу [58].
2. Трубы с наружным профилированием (внутри цилиндрическое отверстие (рис. 1.17). Деформация при этом определяется одной или несколькими профильными волоками, а сменные оправки применяются круглого поперечного сечения, которое уменьшается от перехода к переходу. В этом случае применяются профильные волоки, которые изменяют от перехода к переходу свою форму [59].

Характер деформации материала труб первой и второй групп различен, особенно различается характер заполнения углов профиля и влияние на этот процесс трения металла о деформирующий инструмент.

Вместе с тем, для обоих классов труб характерно то обстоятельство, что течение металла происходит как в поперечном относительно оси волочения и в радиальном направлениях, а также и в продольном относительно оси волочения направлении. Вследствие этого, по периметру деформируемой трубы на гранях происходит утонение стенки, а на ребрах — может возникать утолщение стенки.

Поскольку в очаге деформации имеются две контактные поверхности, на которых возникает трение, то усилие деформации будет повышенным, и возникает ограничение на величину допустимой вытяжки за один переход. В этой связи некоторые из видов профильных труб не могут быть получены за один переход волочения, то есть необходимо применять два и более переходов.

Тогда очаг деформации по рис. 2.1 и 2.2 может соответствовать однопереходному волочению шестигранных труб, а для двухпереходного волочения таких труб заготовка должна иметь предварительное профилирование первого перехода в форме шестигранника со скругленными ребрами и прямолинейными либо криволинейными гранями.

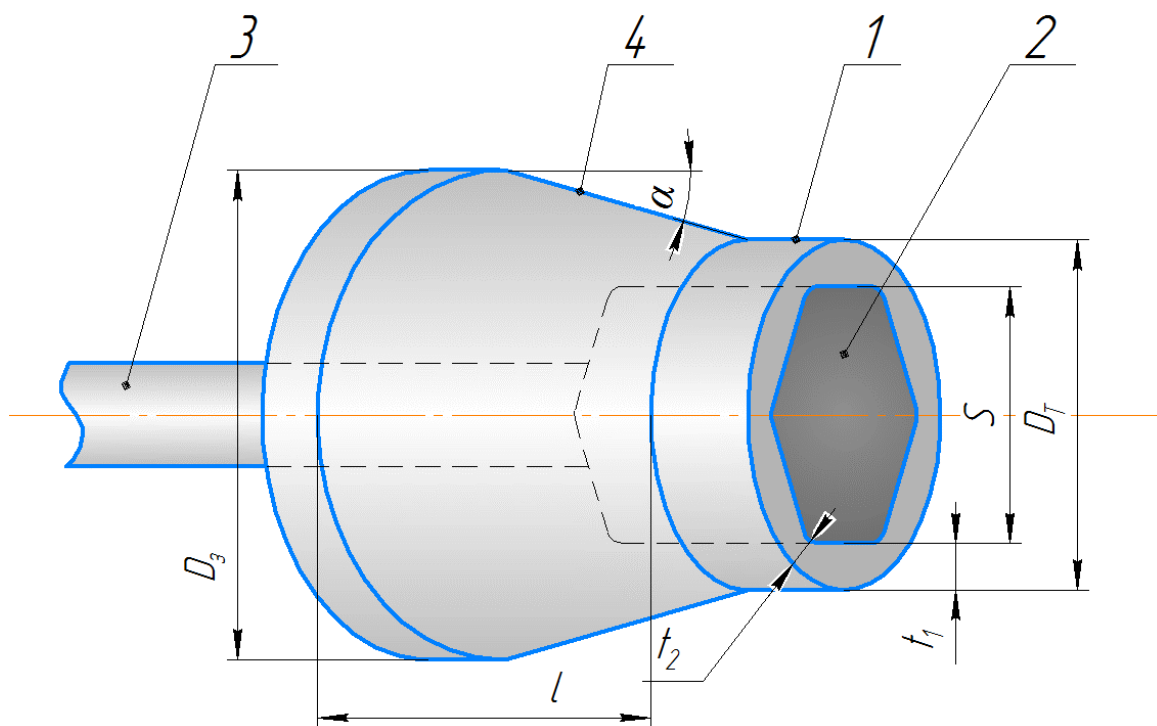


Рис. 2.1. Очаг деформации при внутреннем профилировании шестигранного профиля: 1 – готовая труба; 2 – профильная оправка, 3 – стержень оправки, 4 – рабочий конус. Волока условно не показана.

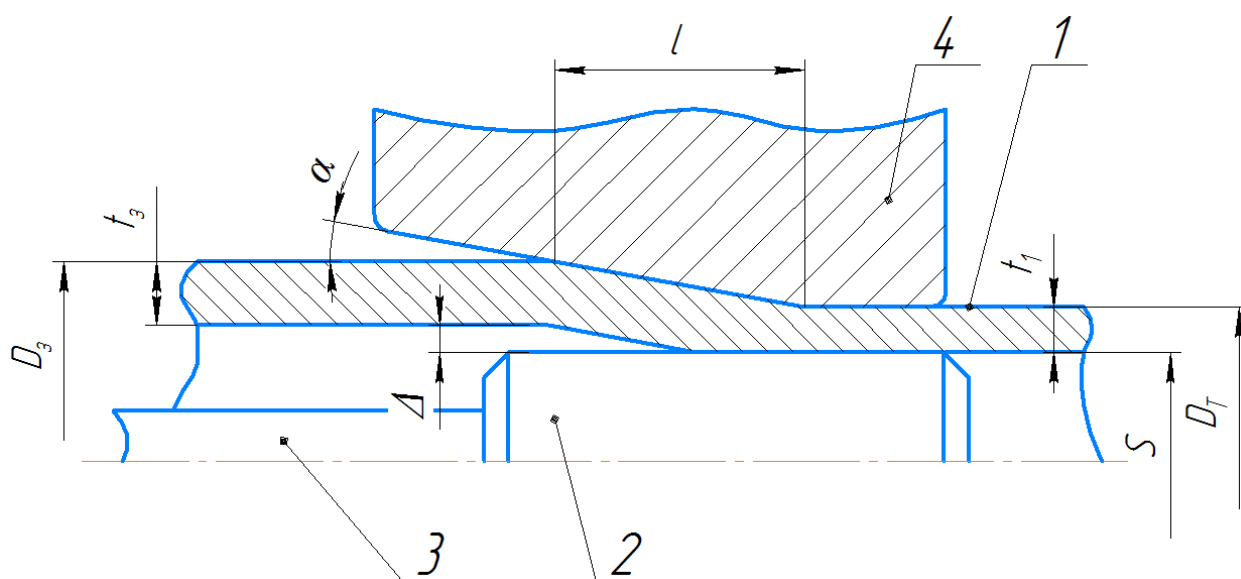


Рис. 2.2. Сечение очага деформации по грани шестигранного профиля. 1 – готовая труба; 2 – оправка; 3 – стержень оправки; 4 – волокна.

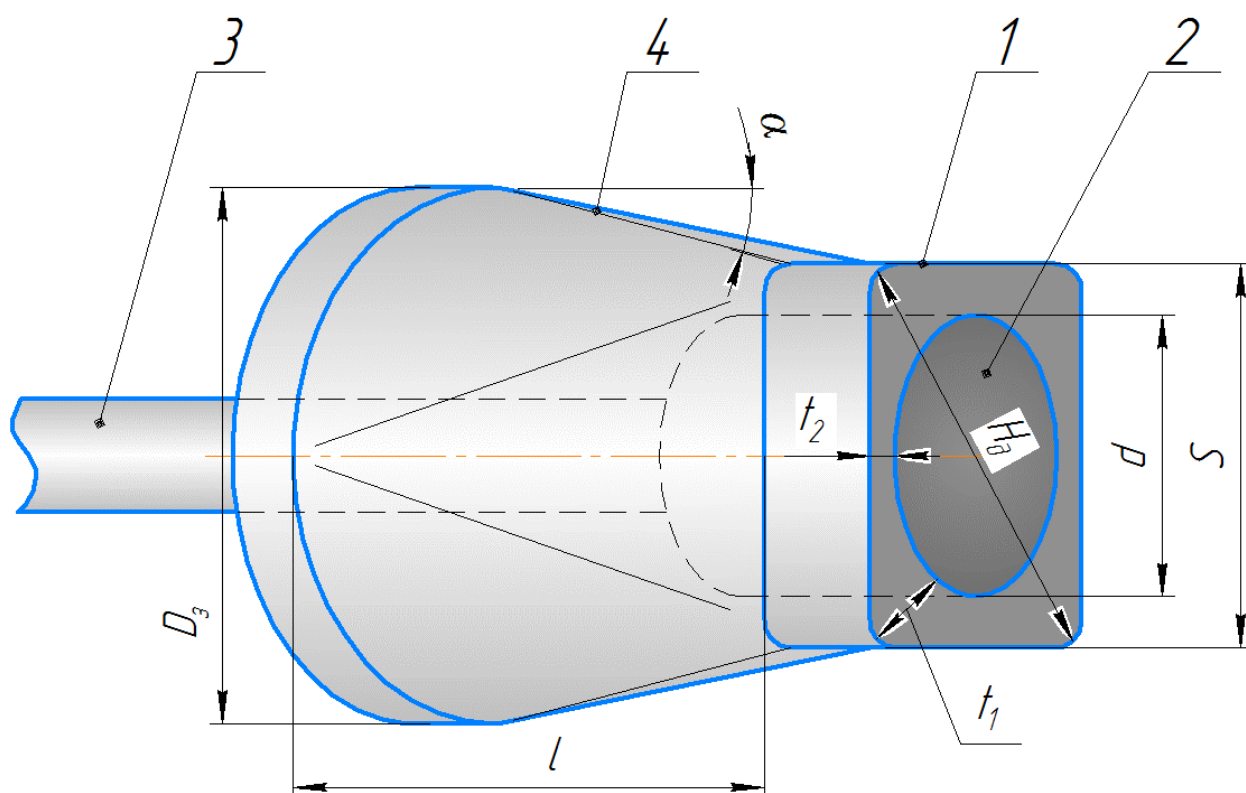


Рис. 2.3. Очаг деформации при наружном профилировании квадратного профиля. Обозначения на рис. 2.1. Волока условно не показана.

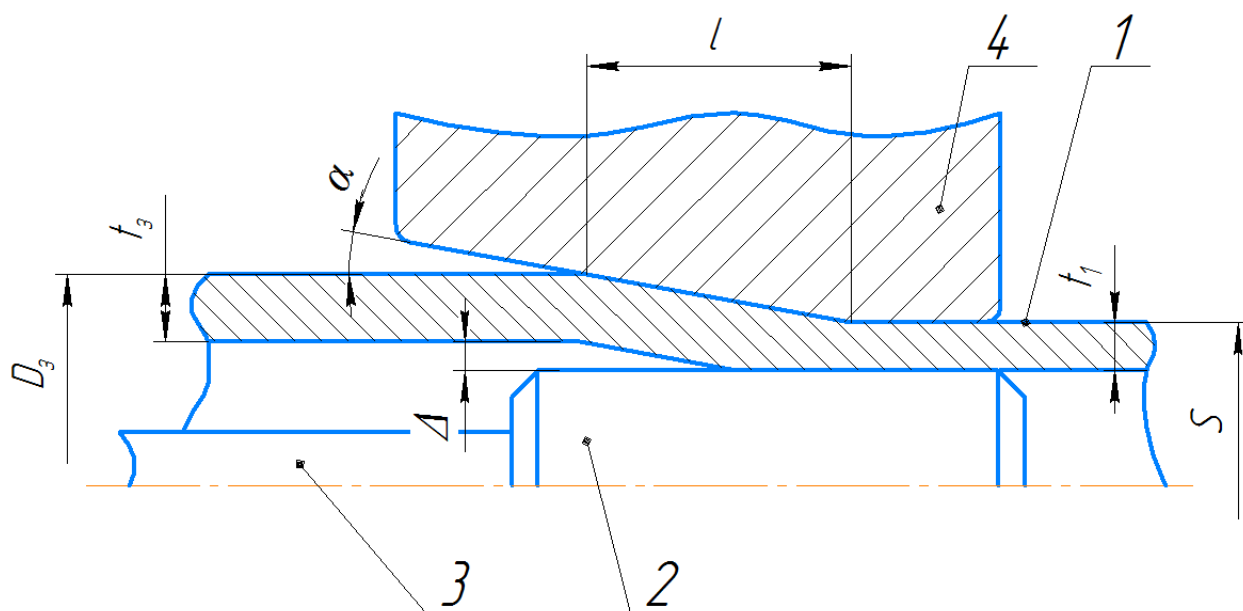


Рис. 2.4. Сечение очага деформации по грани квадратного профиля. Обозначения на рис. 2.2.

В случае волочения круглой трубы с внутренним квадратом схема очага подобна рассмотренной выше. Для изготовления труб с наружным профилированием, например, квадрата, схема очага, показанная на рис. 2.3 и 2.4, соответствует первому переходу, а для второго перехода очаг деформации представляет собой сочетания заготовки квадрата на входе с готовым квадратом на выходе.

Таким образом, при волочении труб в два прохода заготовка, имеющая начальную форму промежуточного перехода, протягивается в волоку, позволяющую получить размеры готового профиля. В том случае, если протягивается труба с криволинейным очертанием поперечного сечения, то промежуточных переходов может быть несколько с постепенным приближением к готовым очертаниям. Этот процесс рассмотрен ниже. Сказанное означает, что для второго и последующих переходов во всех рассмотренных случаях очаг деформации будет несколько отличаться от рассмотренных выше. Это должно учитываться при МКЭ-моделировании.

Также сложная схема процесса деформации будет в том случае, если изготавливаются профильные трубы, имеющие криволинейные очертания (рис. 3). Действительно, при этом осуществляется переход от круглой заготовки к криволинейному профилю. Далее полученная заготовка передается на следующий переход, где труба принимает очертания, в большей мере соответствующие готовому профилю, и выполняется второй переход - и т.д. до готового профиля.

Подводя итог, отметим, что рассмотренные типы очага деформации обладают плоскостной симметрией: трубы, имеющие в своем составе квадрат - плоскостной симметрией четвертого порядка, а имеющие шестигранник - симметрией шестого порядка и т.д. Для криволинейного профиля очаг деформации имеет число плоскостей симметрии, соответствующее числу выступов профиля. Таким образом, очаг деформации при волочении профильных труб рассматриваемого класса - объемный, и он не может быть

сведен к случаю осевой симметрии. Сказанное означает, что для описания очагов следует использовать трехмерную ортогональную систему координат.

Полное описание очага деформации, кроме геометрических моделей, должно включать разработку калибровки инструмента, модель материала обрабатываемой трубы и модель контактного трения, а при необходимости оценку поврежденности металла - модель роста поврежденности. Рассмотрим эти вопросы.

2.2. Разработка метода калибровки рабочего инструмента

Разработка калибровки инструмента в обоих случаях должна содержать следующие необходимые этапы [12]:

1. Определение размеров и формы заготовки;
2. Определение взаимного расположения контуров заготовки и готового профиля;
3. Выбор величины вытяжки и ее распределение по переходам;
4. 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. Задача, следовательно, заключается в том, чтобы находить необходимый наружный диаметр и толщину стенки заготовки. Что же касается взаимного расположения контуров заготовки и готовой трубы, то их продольные оси следует совместить для получения минимума затрат энергии. Рассмотрим принципы определения размеров заготовки.

2.2.1. 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 (с использованием правильных многогранников), так и проектирования калибровки профилей сложной криволинейной формы.

Возможные варианты профилирования ТПТС разделим по форме поперечного сечения готовой трубы на шесть типов: на основе правильных многогранников и криволинейные, размеры которых приведены на рис. 2.5.

К профилям типа 1 и 2 отнесем такие трубы, которые в результате обработки имеют внутреннюю некруглую и наружную круглую поверхности. Их обработка выполняется на профильной оправке, а волока имеет профиль кругового конуса. Профили 3 и 4 имеют снаружи профильную, а внутри цилиндрическую поверхность. Их обработка производится в профильной волоке, а оправка имеет форму, близкую к цилиндрической. Все указанные выше профили имеют в своем составе поверхности в виде правильного многогранника. Рассматриваются также криволинейные профили с наружным профилированием (тип 5) и с внутренним профилированием (тип 6). Профиль 5-го типа снаружи имеет криволинейные очертания, а внутри — цилиндрическую поверхность. Его обработка производится также, как и профилей типа 3 и 4. Профиль типа 6 подвергается обработке по типу профилей 1 и 2.

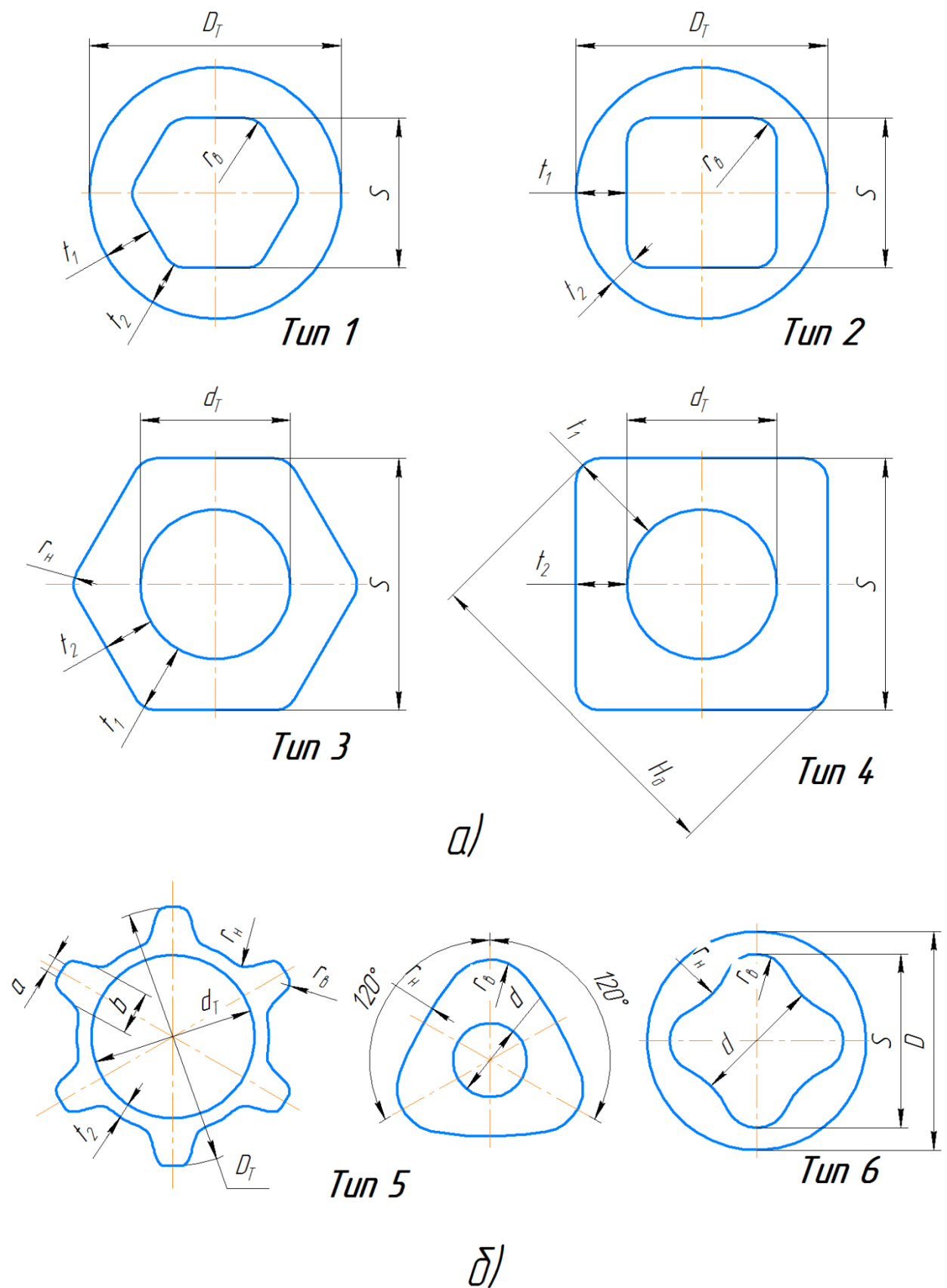


Рис. 2.5. Разновидности профильных ТПТС: а – на основе правильных многогранников, б – криволинейные профили.

Для построения автоматизированной системы используем методы компьютерной геометрии, применение программ которой позволяет строить заданные фигуры, определять их размеры и площадь и др. [61, 62].

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.

Для начала работы автоматизированной системы расчета необходимо выбрать из библиотеки профилей тип геометрии (шестигранник, квадрат и др.) готовой трубы и задать определяющие ее размеры (см. рис. 2.5): наружный диаметр D_T (профилирование по внутреннему диаметру) или внутренний диаметр d_T (при профилировании по наружному диаметру), размер «под ключ» S , радиус скругления по внутреннему r_v или по наружному r_n профилю, а для внутреннего шестигранного профиля — наибольшую толщину стенки готовой трубы t_1 . Поскольку для выбора параметров стана и определения запаса прочности переднего конца трубы необходимо вычисление усилия волочения P_v , то следует также задать марку материала и, следовательно, кривую упрочнения, сопротивление деформации в исходном состоянии, а также коэффициент трения в очаге деформации.

Далее в программе Компас 3D производится по заданным размерам автоматическое построение выбранного профиля, его планиметрия (определение площади поперечного сечения) и определяется минимальная толщина стенки t_2 (шестигранный профиль), либо находим размер трубы по

диагонали профиля H_{∂} , находим наибольшую и наименьшую толщины стенок t_1 и t_2 .

Блок-схема программы расчета параметров заготовки и размеров промежуточного профиля для одно- и двухпереходного волочения приведена на рис. 2.6. Рассмотрим элементы этой блок-схемы и работу программы.

Блок 1 предназначен для выбора типа профиля и в нем из библиотеки профилей производится выбор геометрии (шестигранник, квадрат и др.) готовой трубы и определение типа геометрии 1..4 (**блоки 2 и 3**). **Блок 4** вводит параметры геометрии готового профиля. В **блоке 5** для профилей 1 и 2 задаются диаметр готовой трубы D_T , размер «под ключ» S , наружный радиус сопряжения граней профиля r_n и диаметр отверстия d_T (**блок 6**), профили 3, 4.

Методами компьютерной геометрии [61] производится в **блоке 7** автоматическое построение готового профиля и определение площади поперечного сечения готовой трубы F_T . В результате в **блоке 8** определяется наименьшая толщина стенки профиля t_2 (шестигранник), а также в **блоке 9** размер диагонали H_{∂} , наименьшая t_2 и наибольшая t_1 толщины стенок (для профиля 4).

По этим данным в **блоке 10** для всех типов труб находится средняя толщина стенки готового профиля по рекомендованной в [8] формуле:

$$t_{cp} = (t_2 + 2t_1)/3. \quad (2.1)$$

Полученных данных достаточно для того, чтобы найти по формуле работы [9] наименьшую толщину стенки заготовки t_0 (**блок 11**):

$$lgt_0 = \gamma lg(t_1/t_2) + lgt_2 - (\gamma - 1)lg\left\{\left[\frac{a_1 t_1}{a_2 t_2} + 1\right] / \left(\frac{a_1}{a_2} + 1\right)\right\}, \quad (2.2)$$

где a_1 и a_2 - ширина участков утонения и утолщения стенки при деформации. Для рассматриваемых видов труб $a_1/a_2 = 4$. Коэффициент γ учитывает условия деформации, определяемые величиной степени деформации ε и углом конусности волоки и находится по формуле:

$$\gamma = 1,4 + 1,3t_{cp}(64 - \varepsilon)\sqrt{0,004(\sin\alpha - 0,138)}, \quad (2.3)$$

где ε – степень деформации трубы; α - угол конусности волоки.

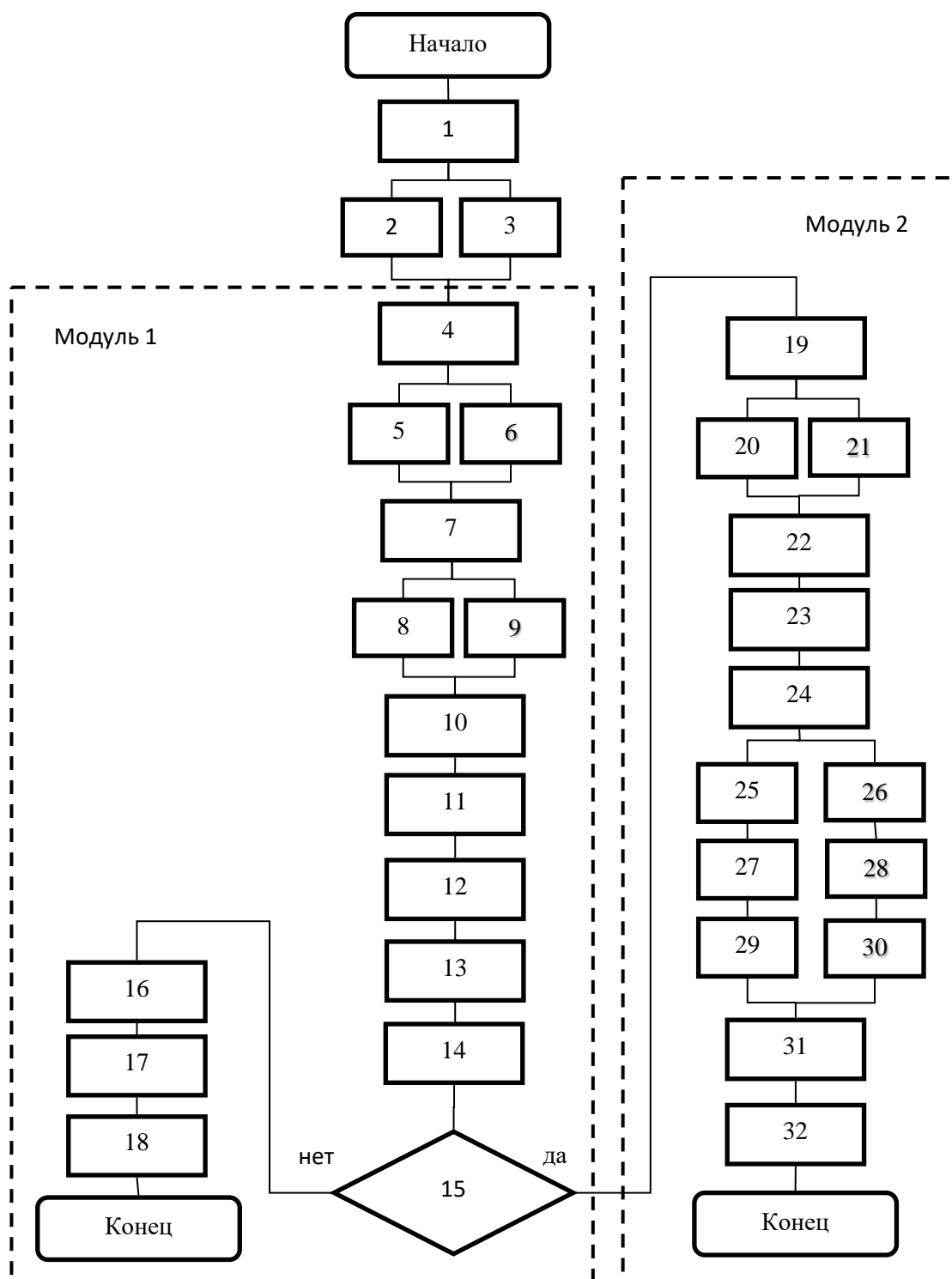


Рис. 2.6. Блок – схема программы расчета параметров заготовки при одно- и двухпроходном волочении ТПТС.

Задаемся углом конусности α (например, $\alpha = 8^\circ$) и примем для первого перехода степень деформации $\varepsilon = 30\%$. Необходимо ввести запас толщины заготовки по стенке $n \geq 1$, то тогда находим толщину стенки заготовки $t_3 = nt_0$.

Поскольку профилирование труб ведется на цилиндрической неподвижной или подвижной оправке, то для свободной ее подачи внутрь трубы необходим зазор между наибольшим наружным размером оправки и внутренней поверхностью трубы. Если производится однопроходное волочение, то следует учесть, что суммарный рост диаметра заготовки вследствие этого равен двум величинам зазора Δ , а если требуется два прохода, то четырем радиальным зазорам. В результате находим диаметр заготовки D_3 , определяя диаметр описанной окружности внутреннего многоугольника и радиуса закругления профиля и оправки (для трубы типа 1).

Для квадратной трубы с внутренним отверстием находим D_3 , равного сумме отверстия готового профиля, зазора между оправкой и толщиной стенки заготовки t_3 .

Полученные размеры заготовки, как правило, отличаются от имеющихся в ГОСТах для круглых труб. Холоднодеформированные трубы приведены, например, в ГОСТ 8734-75, горячедеформированные — в ГОСТ 8732-87. Принимаем в этой связи ближайшие большие размеры заготовки (**блок 12**). По этим размерам производим новое построение профиля и его планиметрирование. Определяем новые значения площади поперечного сечения заготовки F'_3 (**блок 13**). Следующим шагом находим вытяжку по маршруту (**блок 14**).

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 если это возможно, получение

этих размеров непосредственно на трубном заводе при горячей или холодной прокатке.

В **блоке 15** происходит по признаку $\varepsilon > 30\%$ деление на однопроходное волочение (**блок 16**) или на двухпереходное волочение (**блок 19**). Далее выполняется по найденной формуле (см. 2.4) расчет усилия волочения P_v (**блок 17**), определение коэффициента запаса прочности переднего конца k_3 (**блок 18**). Последняя величина находится как отношение предела текучести материала трубы, вышедшей из волоки (с учетом упрочнения) к напряжению волочения σ_v .

Далее при необходимости ведем расчет для многопереходного волочения. Путей перехода от размеров и конфигурации заготовки к параметрам готовой трубы может быть весьма много. Как показано в ряде работ [12, 21] для сплошных профилей, действительным будет такой, при котором металл перемещается по линиям тока, ортогональным к исходному и конечному профилям, а контур рабочего инструмента соответствует эквипотенциалам, ортогональным линиям тока. Положение эквипотенциалей на линиях тока определяется необходимым значением вытяжки.

Для определения конфигурации и размеров промежуточного профиля ТПТС разработан компьютерный способ построения линий тока и эквипотенциалей. Положение эквипотенциалей можно определить, задаваясь вытяжками первого, второго или последующих переходов [7]. Эта процедура рассмотрена в работе [64].

Основываясь на вышесказанном, рассмотрим процедуру двухпроходного волочения модуля 2 (**блок 19** – начало расчета двухпроходного волочения). В **блоках 20 и 21** происходит деление профилей на типы (например, 2 и 4). Далее по заданному размеру готового профиля, т.е. по известным начальной и конечной площадям поперечного сечения ТПТС находим суммарную вытяжку μ_Σ как отношение указанных выше площадей и единичные вытяжки за первый и второй переходы μ_1 и μ_2 (**блок 22**). Как показано выше, далее строим линии тока металла (**блок 23**) и ортогональные

к ним эквипотенциали (**блок 24**) [65]. Такое построение позволяет задать калибровку волок первого и второго переходов волочения. Методами компьютерной геометрии находим все размеры промежуточного профиля, а именно **блоки 25, 27 и 29** – для профиля типа 2, а **блоки 26, 28, 30** – для профиля типа 4. В заключении программы определяем усилие волочения P_v (**блок 31**) и коэффициенты запаса прочности переднего конца трубы при волочении (**блок 32**).

На основе предложенной автоматизированной системы выполнены расчеты, некоторые результаты приведены для однопроходного волочения (рис. 2.7) и для двухпроходного волочения (рис. 2.8, 2.9 и 2.10).

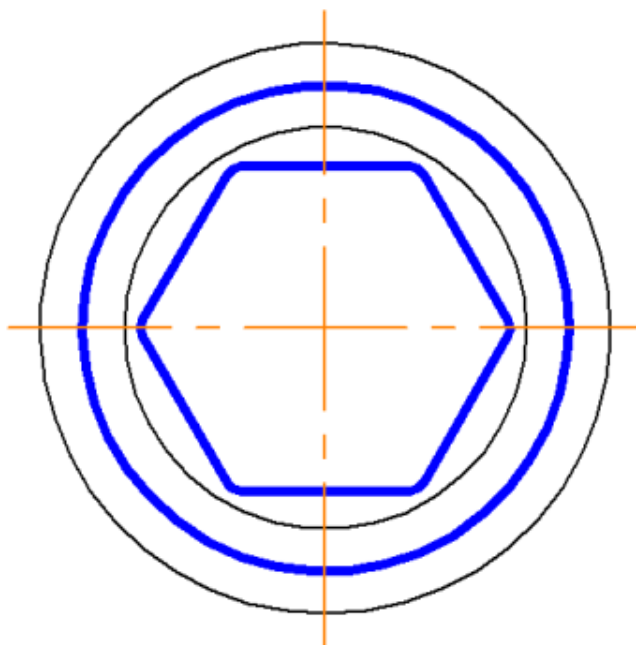


Рис. 2.7. Однопроходное волочение: круг – внутренний шестигранник. Толстые линии – контуры поперечного сечения готовой трубы, тонкие линии – контуры заготовки.

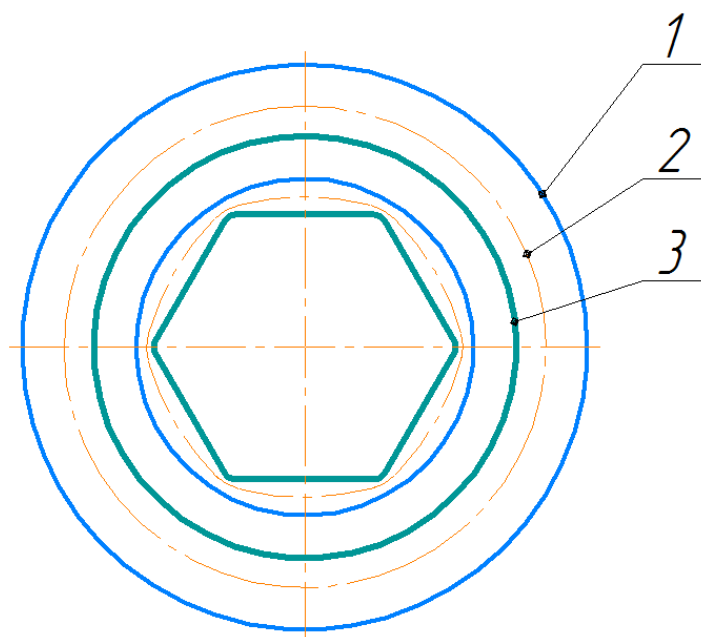


Рис. 2.8. Двухпроходное волочение: круг – внутренний шестигранник. 1- контуры заготовки, 2 - контур промежуточного перехода, 3 - готовая труба.

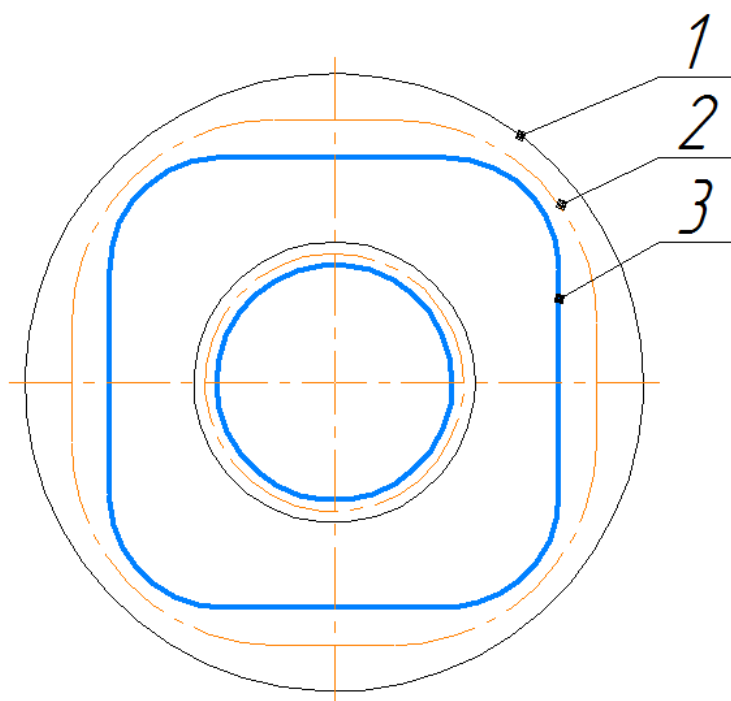


Рис. 2.9. Двухпроходное волочение: круг – наружный квадрат. 1- контур заготовки, 2 - контур промежуточного перехода, 3 – готовая труба.

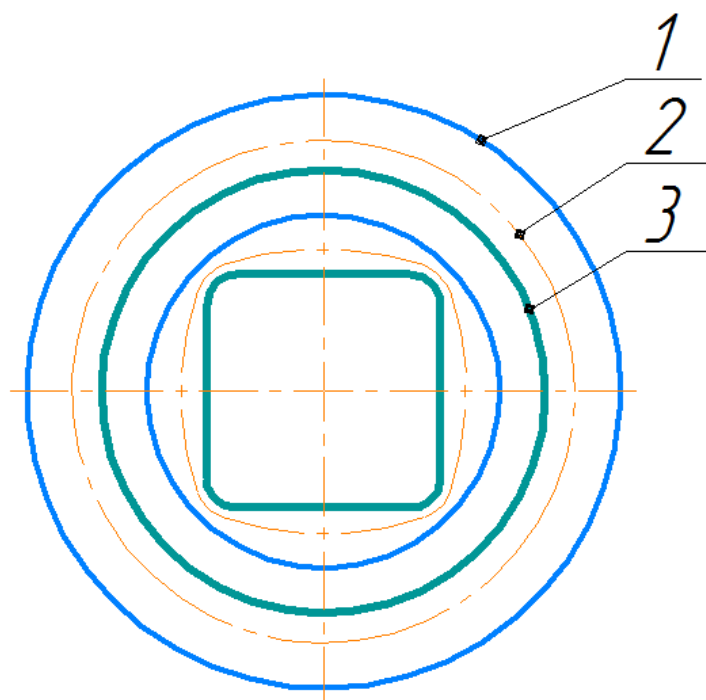


Рис. 2.10. Двухпроходное волочение: круг –внутренний квадрат. 1- контур заготовки, 2 - контур промежуточного перехода, 3 – готовая труба.

Для расчета геометрических параметров заготовки при волочении криволинейных профилей [65] разработан модуль 3 (рис. 2.11). В **блоке 33** определяется число переходов волочения. **Блок 34** определяет маркер $i=0$ для организации цикловых расчетов. **Блок 35** определяет расчет геометрии первого промежуточного перехода. **Блок 36** предназначен для определения площади поперечного сечения первого перехода. В **блоке 37** вычисляется усилие волочения, а в **блоке 38** – коэффициент запаса прочности переднего конца трубы. **Блок 39** предназначен для вывода параметров геометрии и силовых условий первого промежуточного перехода. **Блок 40** предназначен для организации цикла вычислений $i=i+1$ по переходам. Далее в **блоке 41** производится сравнение $i < n$. В случае, если $i < n$, то управление передается в **блок 34** для вычисления геометрических и силовых параметров второго промежуточного перехода. Цикл вычислений повторяется до достижения условия $i=n$, при этом работа модуля заканчивается (**блок 42**) [67].

Пример определения параметров заготовки для многопереходного волочения криволинейного профиля приведен на рис. 2.12.

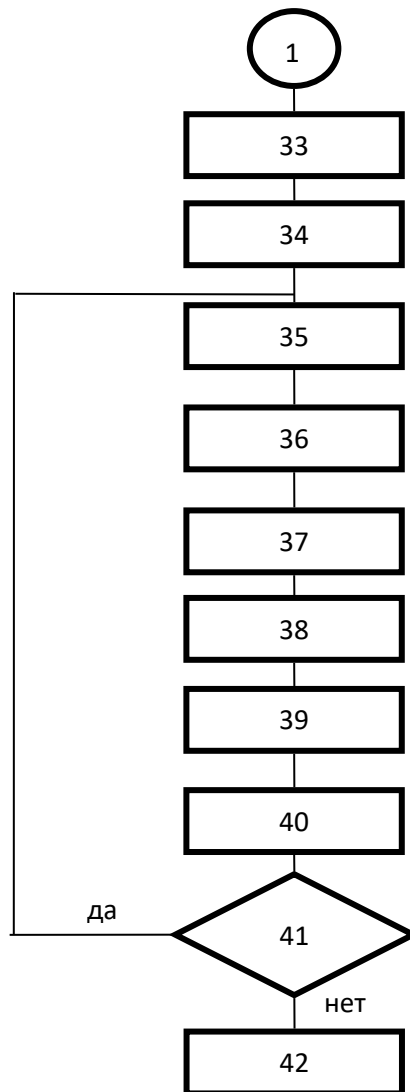


Рис. 2.11. Модуль 3 блок-схемы программы расчета параметров заготовки при волочении криволинейной ТПТС.

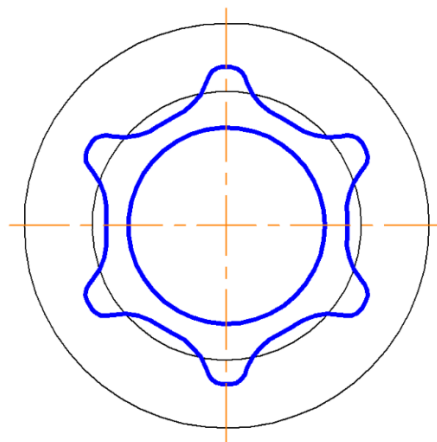


Рис. 2.12. Многопроходное волочение криволинейного профиля. Толстые линии – контуры поперечного сечения готовой трубы, тонкие – контуры заготовки.

2.2.2. Линии тока металла, эквипотенциали и профиль инструмента

В практике возможны случаи, когда готовая профильная труба не может быть получена за один переход и необходимо определять калибровку инструмента на промежуточных размерах второго и последующих переходов. Особенно это важно при изготовлении профильных труб криволинейного очертания, когда поверхности инструмента по переходам не являются подобными друг другу фигурами.

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

Построение линий тока и эквипотенциалей для проектирования процессов производства ТПТС в данной работе распространено на полые изделия, что позволило определить профиль рабочего инструмента. Для определения положения линий тока металла, эквипотенциалей и профиля инструмента ниже разработана методика их компьютерного построения, которая кратко выглядит следующим образом.

Случай 1. Построение линий тока для проектирования волочения наружной поверхности многогранника с внутренним отверстием. В качестве примера рассмотрим волочение квадратной трубы с внутренним круглым отверстием, строим наружный и внутренний (отверстие) контуры готовой трубы, которые принимаются за эквипотенциали (рис. 2.13). Поскольку для рассматриваемого случая имеет место плоскостная симметрия четвертого порядка, то рассматриваем $1/8$ часть всего профиля. Для труб, имеющих наружную поверхность иного очертания и иную симметрию,

выделение такого участка может быть соответственно другим. Далее эти кривые (для заготовки и готового профиля) описываем в программе Компас-График кубическими β – сплайнами Безье [68, 69]. Следует заметить, что упомянутая выше компьютерная программа имеет широкие возможности построения кривых с заданными свойствами и их разнообразного редактирования, планиметрирования и т.д.

Выражение для кубического β –сплайна Безье выглядит следующим образом [70]:

$$\beta(\tau) = (1 - \tau)^3 P_0 + 3\tau(1 - \tau)^2 P_1 + 3\tau^2(1 - \tau) P_2 + \tau^3 P_3, \quad \tau \in [0, 1], \quad (2.4)$$

где P_0, P_1, P_2 и P_3 - четыре опорные точки.

Как известно, сплайн – это кривая, имеющая наименьшую кривизну, и проходящая через заданные точки, т. е. он является линией наименьшей длины. Именно эти требования выдвигаются при построении линий тока. Участок внешней кривой заготовки делится на равные части. В точках – границах участков строим кривую Безье (линию тока) через соответствующие точки начального (заготовки) профиля.

Кривые Безье отредактированы таким образом, чтобы при пересечении профилей касательные к ним были параллельны вспомогательным перпендикулярам. В свою очередь, полученный набор кривых – линий тока делятся на части, определяемые вытяжками в первом, втором или в последующих переходах.

Основываясь на результатах, приведенных в работе [19], такое деление производится по следующей процедуре. Зная суммарную вытяжку при многопереходном процессе μ_Σ , находим среднюю вытяжку μ_{cp} по формуле:

$$\mu_{cp} = \sqrt[n]{\mu_\Sigma}, \quad (2.5)$$

где n – число протяжек.

Далее распределяем единичные вытяжки по переходам, выполняя условие

$$\mu_\Sigma = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \dots \mu_n. \quad (2.6)$$

По принятым значениям единичных вытяжек находим площади поперечного сечения по переходам:

$$F_1 = \frac{F_0}{\mu_1}; F_2 = \frac{F_1}{\mu_2}, \dots, F_n = \frac{F_{n-1}}{\mu_n}. \quad (2.7)$$

Далее ищем

$$\alpha_1 = \sqrt{F_0} - \sqrt{F_1}; \alpha_2 = \sqrt{F_1} - \sqrt{F_2}, \dots, \alpha_n = \sqrt{F_{n-1}} - \sqrt{F_n}. \quad (2.8)$$

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 эквипотенциалами. Две соседние эквипотенциали определяют собой профили входного и выходного сечения необходимых волок (рис. 2.13).

Действительно, эквипотенциаль 1 определяет входной контур волокни первого перехода, а эквипотенциаль 2 – ее выходной контур. В свою очередь, эквипотенциаль 2 определяет входной контур волокни во втором переходе, а эквипотенциаль 3 – выходной профиль второй волокни, и, следовательно, профиль готовой трубы.

В особых точках a и b профиля (см. рис. 1) внешняя и следующая за ней внутренняя эквипотенциаль имеют касательные, параллельные одна другой. Следовательно, линия тока здесь будет прямой линией. Однако в этом случае такая прямая есть линия Безье, определяемая по формуле [70, 71]

$$\beta(\tau) = (1 - \tau)P_0 + \tau P_1, \tau \in [0, 1], \quad (2.9)$$

где P_0 и P_1 - координаты точек первой и второй эквипотенциалей.

Случай 2. Построение линий тока трубы для профилирования внутренней поверхности шестигранника с наружной круглой поверхностью стенки. В этом случае описываем кривыми Безье внутреннюю поверхность заготовки и заданную поверхность шестигранника (рис. 2.14). Как и ранее, учитываем плоскостную симметрию профиля (шестой порядок) и рассматриваем 1/12 часть всего профиля кривой. Далее построения

производим, как и в предыдущем случае. Отличие заключается в том, что наружный контур трубной заготовки и его последующие по переходам положения (на рисунке не показаны) определяются конфигурацией последовательно применяемых круговых конических волок. Следовательно, эти контуры представляют собой последовательно уменьшающиеся окружности, а внутренняя поверхность профиля заготовки принята в виде эквипотенциали (на рисунке – контур 1). При протягивании трубы на профильной оправке внутренняя поверхность трубы принимает вид первой эквипотенциали 2 (контур оправки на промежуточном переходе), а контур 3 определяет профиль оправки на готовом переходе.

Практика использования волок промежуточных переходов для изготовления труб с переменной толщиной стенки показывает, что зачастую грани волок рекомендуется выполнять плоскими, а радиусы скруглений граней принимать по эмпирическим формулам, например, пропорционально толщине стенки. Такой подход позволяет упростить изготовление волок, но не является рациональным с точки зрения исключения дополнительных сдвигов при течении металла. Кроме того, известные технологии обработки канала волок (например, электроискровая, электрохимическая технологии и др.) позволяют изготовить волокни с гранями, отличными от плоской. Обработка оправок криволинейной формы также не представляет особых трудностей, например, на основе некруглого шлифования.

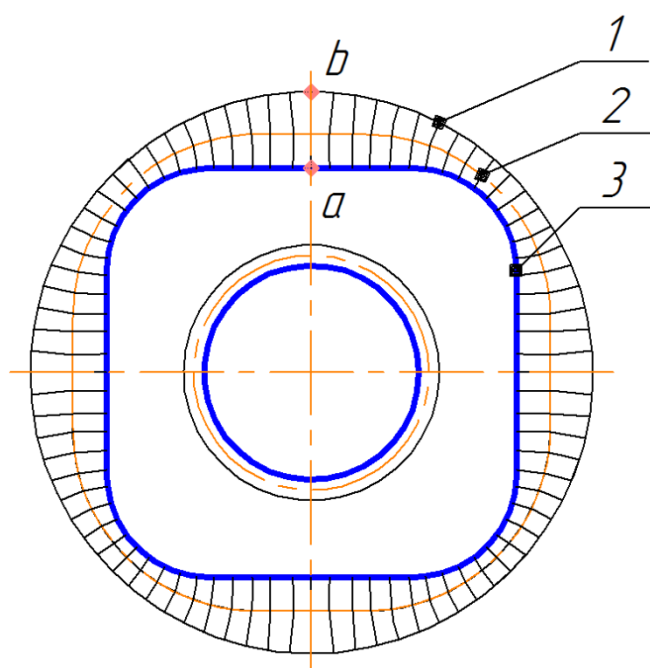


Рис. 2.13. Контуры поперечного сечения заготовки (1), готовой трубы (3) и промежуточного перехода (2).

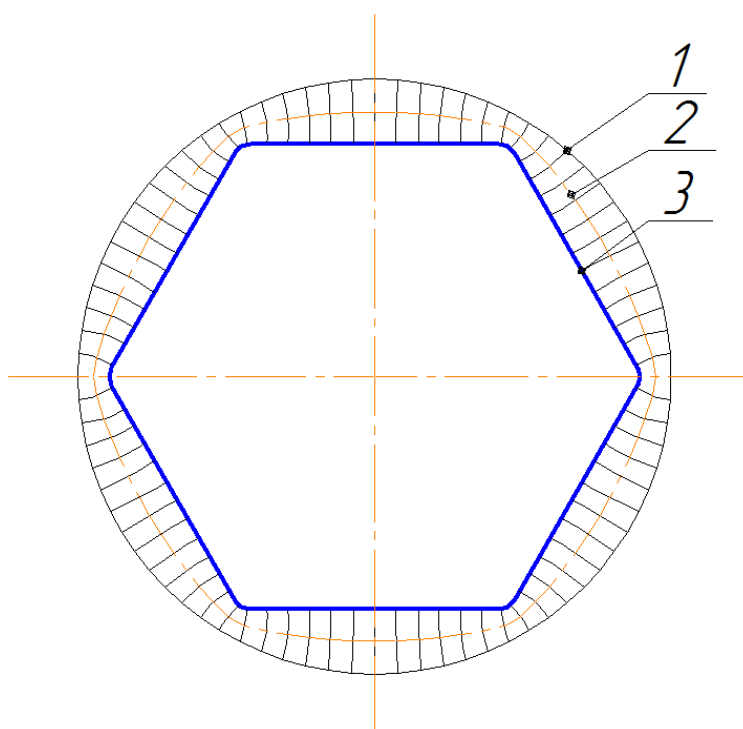


Рис. 2.14. Контуры поперечного сечения внутренней поверхности заготовки 1 (тонкая линия), промежуточного перехода 2 (штрих-пунктир) и готовой трубы 3 (толстая линия). Наружные контуры заготовки и готовой трубы не показаны.

Для криволинейного профиля (рис. 2.15) контуры профильных волок должны принимать последовательно положения от первого ко второму, затем к третьему, или, если необходимо, к четвертому, и т.д. (готовому наружному профилю). При этом используются последовательно уменьшающиеся цилиндрические оправки, если волочение осуществляется на неподвижных оправках и отверстие задается на первом переходе, если используется волочение на подвижной оправке.

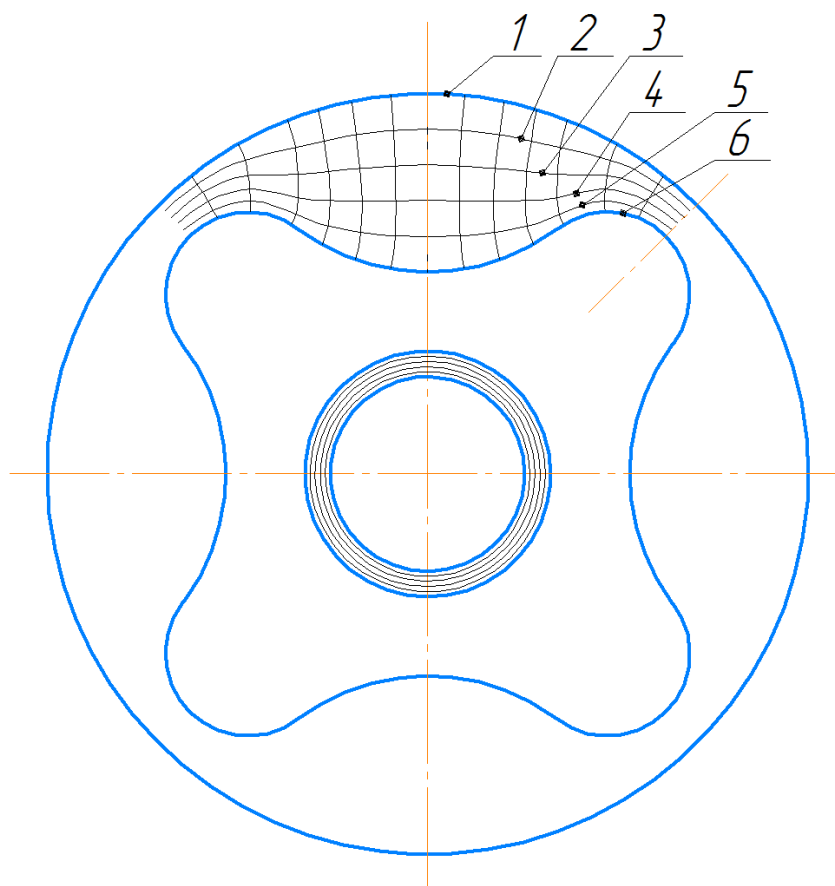


Рис. 2.15. Последовательность формоизменения металла в очаге деформации при волочении в пять переходов криволинейного профиля: 1 – наружный диаметр заготовки, 2, 3, 4, 5 – эквипотенциали промежуточных переходов, 6 – контур готовой трубы.

Построение линий тока и эквипотенциалей для профиля с продольными выступами и впадинами приведено на рис. 2.16. Здесь необходимо разбивку наружного контура (заготовки) выполнять с небольшим шагом с целью

получения более частой сетки линий тока и более точного расположения эквипотенциалей.

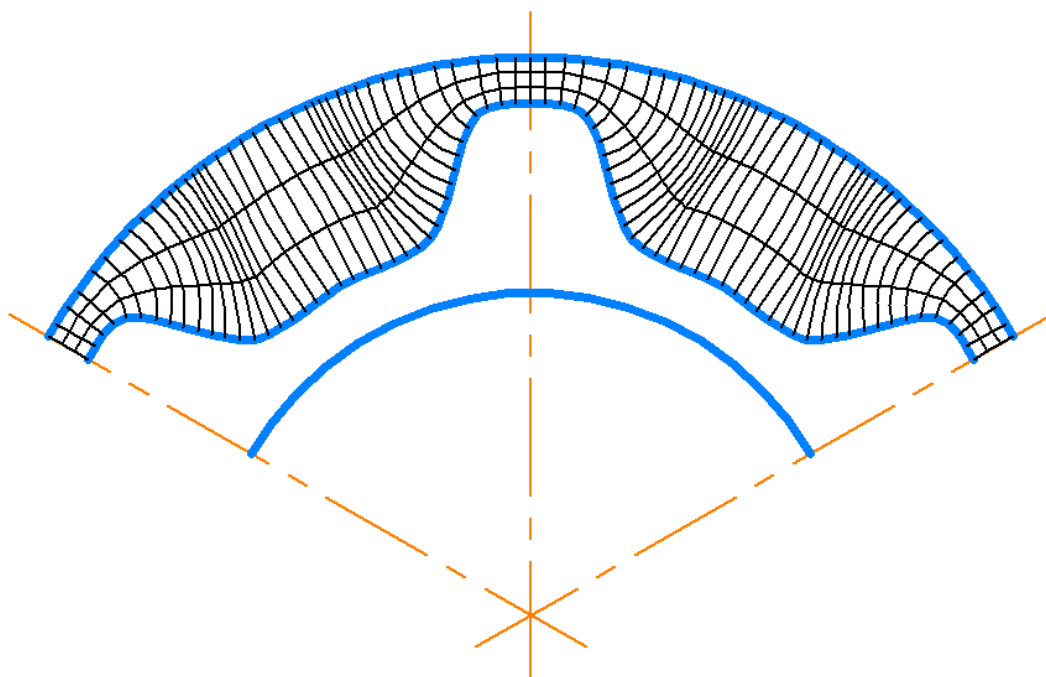


Рис. 2.16. Построение линий тока и эквипотенциалей для трубы с продольными выступами.

Определение конфигурации волок на основе построения трубки тока для этого случая показано на рис. 2.17. Подобным образом, с использованием компьютерной графики может быть построен профиль инструмента для изготовления труб с внутренними криволинейными ребрами.

В том случае, когда профиль готовой трубы имеет значительные местные изменения сечения, то для более точного его отображения посредством эквипотенциалей в таких зонах линии тока необходимо сгущать. При этом сгущенные линии тока следует начинать строить не от контура исходной заготовки, а от следующих за ним эквипотенциалей, приближенных к контуру готовой трубы для случая наружного профилирования, или, наоборот, удаленных от него для случая внутреннего профилирования.

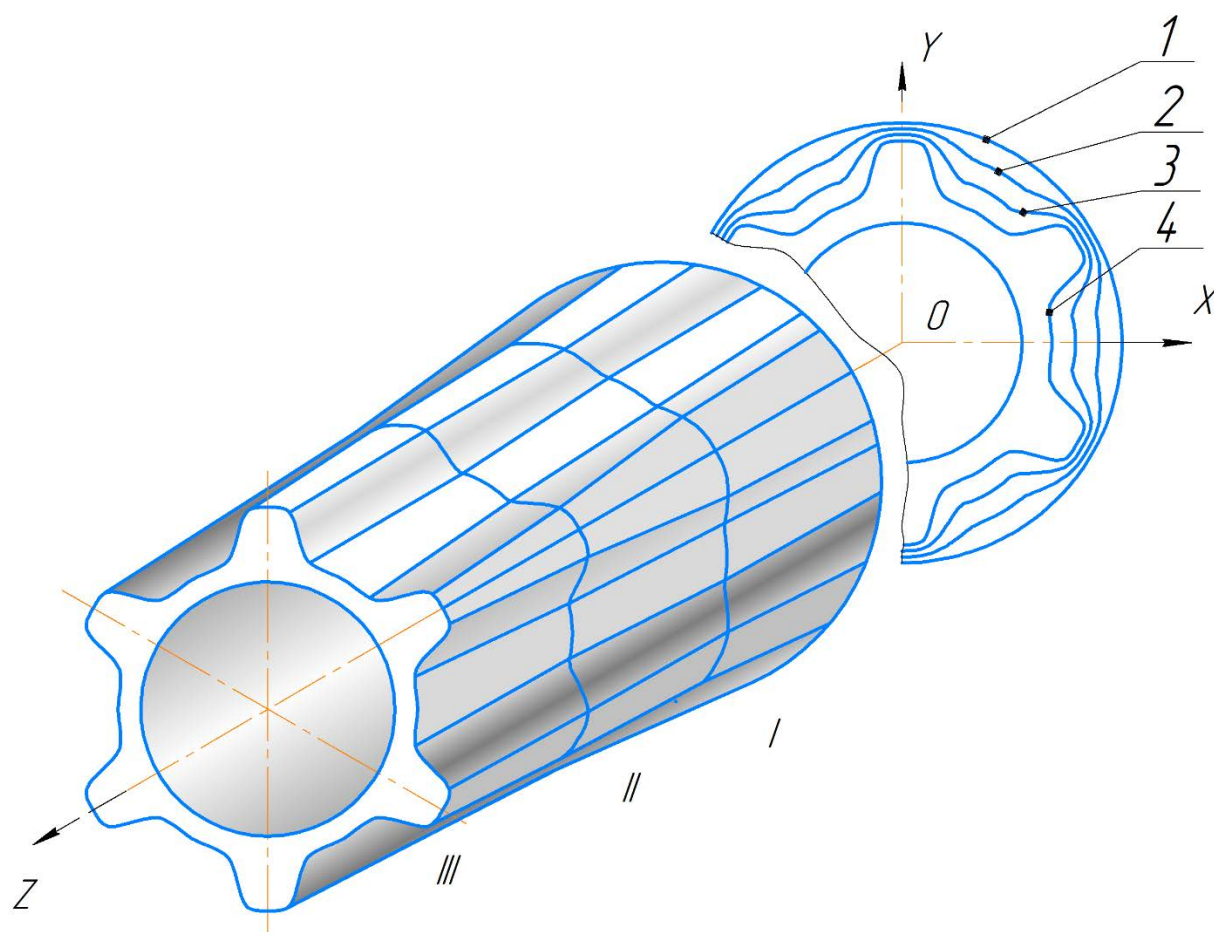


Рис. 2.17. Продольный профиль инструмента при волочении криволинейного профиля в три перехода: 1 – наружный контур заготовки; 2,3 – эквипотенциали первого и второго переходов; 4 – контур готовой трубы. I, II и III – калибровка волок первого, второго и третьего переходов.

Определение продольного профиля инструмента.

Полученные выше поперечные сечения в виде эквипотенциалей и расстояния между ними, измеренные по нормальям (линиям тока) позволяют определить длину рабочей части рабочего профилирующего инструмента. Вместе с тем необходимо определить боковую поверхность инструмента. С этой целью использован следующий принцип [67]. Будем применять линейчатые поверхности, определяемые эквипотенциалами. Аналитическое описание рабочего инструмента для пластической деформации металлов линейчатыми поверхностями выполнено в работах [72, 73].

Для правильных многоугольников строим регулярные коноиды с образующими в виде прямых линий. Условие параллелизма [74] 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 эквипотенциалами.

Необходимо также определить осевое расстояние между соседними эквипотенциалами, которое может быть найдено, если известен угол наклона образующей боковой поверхности. Этот угол находим из условия минимума усилия волочения. При необходимости могут быть получены аналитические выражения, либо выполнено задание поверхностей облаком точек в трехмерном пространстве.

Определенный таким образом профиль можно использовать в качестве исходного для дальнейшего твердотельного моделирования и изготовления инструмента. Одними из перспективных маршрутов представляются следующие. Модель канала волокна путем вычитания из модели корпуса волокна превращают в трехмерную модель волокна. После добавления вспомогательных элементов (фасок, скруглений, выходного и входного конусов) модель может быть распечатана на трехмерном принтере достаточной точности с использованием легкоплавкого полимерного или воскового материала. Полученная промежуточная модель используется в качестве выплавляемой для литья детали - рабочей части волокна из твердого сплава. Второй перспективный маршрут предполагает непосредственное создание рабочей части волокна путем послойной трехмерной печати. Рациональными технологиями здесь представляются послойное нанесение и спекание порошка.

2.3. Уравнения механики деформирования и инварианты напряженно – деформированного состояния

Принятые выше объемные схемы очага деформации должны в результате необходимых расчетов позволять определить величины и характер распределения действующих напряжений и деформаций, и, кроме того, перемещения точек поверхности профилей, которые затем могут быть использованы для описания формоизменения металла, нахождения распределения интенсивности деформаций, показателя напряженного состояния и величины поврежденности металла и отыскания опасных с этой точки зрения условий процесса, оценки рациональности выбора профиля волочильного канала и определения энергосиловых условий процесса и рекомендовать типоразмер станов. Необходимо также найти давление металла на инструмент, что определяет его работоспособность.

Поскольку принятые модели очага деформации не могут быть сведены к плоским или осесимметричным и являются объемными, то принята трехмерная ортогональная система координат. Рассмотрим уравнения теории пластичности для этого случая [75]. Напряженное состояние можно описать шестью компонентами тензора напряжений: тремя нормальными $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и тремя касательными $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ с учетом трех равенств: $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$.

Эти величины составляют три уравнения равновесия в частных производных, кроме того, имеются шесть уравнений, связывающих перемещения точек среды U_x, U_y, U_z , с малыми деформациями $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ (линейные деформации) и $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ (угловые деформации) — уравнения Коши. Для получения замкнутой системы уравнений необходимо 9 уравнений дополнить шестью условиями связи напряжений и деформаций (физические уравнения). Таким образом для определения 15 неизвестных имеется 15 уравнений.

Далее следует для определенности задать граничные условия на некоторых поверхностях в напряжениях или в перемещениях.

В рассматриваемых нами задачах задается перемещение на переднем конце, определяемое перемещением тягового органа волочильного стана. При анализе напряженно-деформированного состояния воспользуемся инвариантами — величинами, не зависящими от выбора системы координат. Такими величинами приняли: интенсивность напряжений σ_i , интенсивность касательных напряжений T , интенсивность деформации ε_i , величина гидростатического давления σ , степень деформации сдвига λ . Эти инварианты будем записывать в главных напряжениях $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \dots$ и главных деформациях. Тогда будем иметь: интенсивность напряжений в главных напряжениях:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} . \quad (2.10)$$

Интенсивность касательных напряжений

$$T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} . \quad (2.11)$$

Интенсивность деформации в главных деформациях, пропорциональных главным напряжениям, будет:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} . \quad (2.12)$$

Степень деформации сдвига

$$\lambda = \sqrt{3} \varepsilon_i . \quad (2.13)$$

Гидростатическое давление

$$\sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} . \quad (2.14)$$

Показатель напряженного состояния

$$K = \frac{\sigma}{T} . \quad (2.15)$$

При расчетах поврежденности металла будет использован показатель Лоде, определяющий вид напряженного состояния [27]

$$\mu_\sigma = \frac{(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} . \quad (2.16)$$

Величина степени деформации, как определил А.А. Ильюшин, может быть при деформировании металла с момента времени τ_0 до момента τ_1 найдена в виде

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{\tau_0}^{\tau_1} H d\tau, \quad (2.17)$$

где H – интенсивность скоростей деформаций сдвига.

Если на входе и выходе в очаге деформации происходит изменение траектории движения частицы (например, волочение в конической матрице), то найдено

$$\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^{\tau} H d\tau, \quad (2.18)$$

где $\Delta\varepsilon_0$ и $\Delta\varepsilon_1$ — приращения степени деформации в зонах изменения траектории частицы.

Модель среды.

При холодной пластической деформации в общем случае сопротивление деформации σ_s зависит лишь от степени деформации и его находят в виде [76, 77]:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + g\lambda^b, \quad (2.19)$$

где $\sigma_{0,2}$ — сопротивление деформации отожжённого образца;

g и b — коэффициенты аппроксимации.

В таблице 2.1 приведены данные [76] по материалам, использованным в настоящей работе.

Таблица 2.1

Материал труб	Параметры кривой упрочнения		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	g , МПа	b
Сталь 20	280,3	418,3	0,39
Сталь 12X18Н10Т	321,7	813,4	0,405
Технический титан BT1-0	553,3	421	0,519

Построенные по этим данным графические зависимости приведены на рис. 2.18.

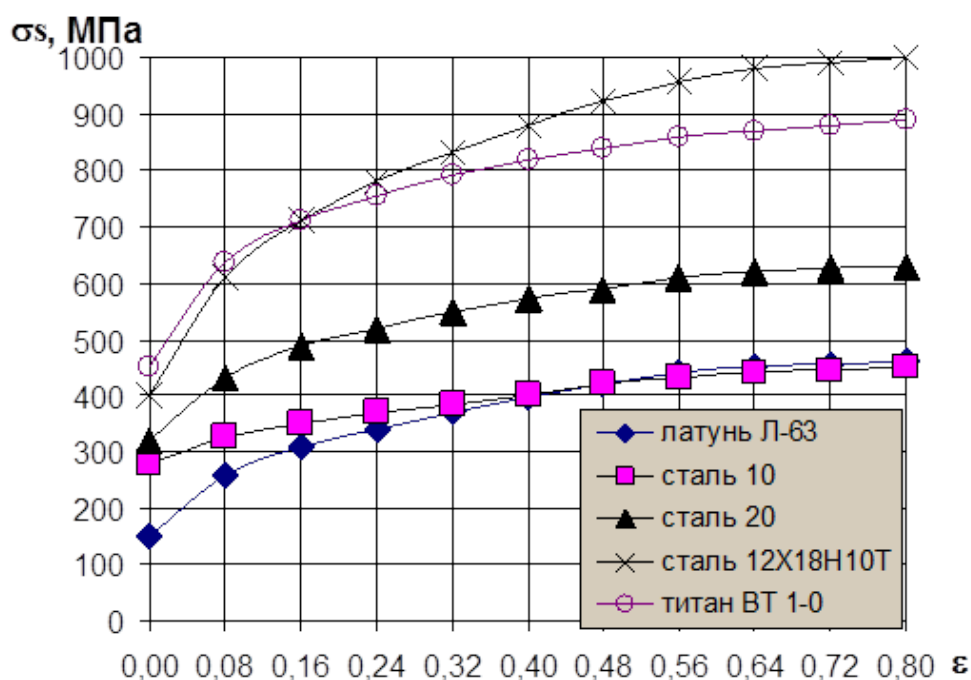


Рис.2.18. Зависимость предела текучести от степени деформации для исследованных материалов.

Контактное трение. В работе предлагается рассматривать волочение труб на оправке, причем толстостенность этих труб может быть значительной. В этих условиях зависимость контактного трения приняли в виде закона Зибеля.

$$\tau = \psi \sigma_s, \quad (2.20)$$

где ψ — показатель сил трения, зависящий от материала протягиваемых труб, их материала, смазки и т.д. [49]

Модель поврежденности материала. При пластической деформации происходит накопление повреждений: вначале в металле образуются микропоры, которые при дальнейшем процессе могут сливаться и образовывать микротрещины, вплоть до возникновения трещин и разрушения. Процесс соответствующей термообработки может залечивать эти повреждения, и материал становится вновь пригоден к пластической деформации.

Определять поврежденность металла особенно необходимо при изготовлении труб и труднодеформируемых материалов (легированные стали,

сплавы титана и др.), а также в условиях, когда напряженное состояние при деформации неблагоприятно: при наличии растягивающих напряжений, значительных степеней деформации. Что же касается ТПТС, то имеет место в некоторых случаях повышенная толстостенность заготовок, локализация пластической деформации в углах или выступах профиля.

Кроме того, однократная деформация в некоторых случаях не позволяет получить готовый профиль и процесс необходимо выполнять, особенно для профилей сложной формы, в несколько проходов. Оправочное волочение требует для нормального протекания процесса качественной смазки. В этой связи необходимо определить место промежуточной термообработки и нанесения подсмазочного и смазочного слоев.

В данной работе использована феноменологическая теория накопления поврежденности на основе работ В.Л. Колмогорова [78], развитая затем А.А. Богатовым, С.В. Смирновым [79] для холодной деформации, которая позволяет рассчитать этот показатель. Выражение для поврежденности металла ω записывают в виде модели А.А. Богатова:

$$\omega = \sum_{i=1}^n \int_0^{\lambda_i} \frac{a\lambda^{a-1}}{\lambda_p^a} d\lambda, \quad (2.21)$$

где n — число актов пластической деформации.

λ_p — степень деформации, при которой наступает разрушение при известном напряженном состоянии.

Степень деформации до разрушения λ_p определена [76] экспериментально при различных значениях показателя напряженного состояния σ/T и значениях параметра Ляме. В результате предложена, например, зависимость [76, 79]:

$$\lambda_p = [\chi_2 - (\chi_1 - \chi_2)\mu_\sigma] \exp[\lambda_2 - (\lambda_1 - \lambda_2)\mu_\sigma] \frac{\sigma}{T}, \quad (2.22)$$

где $\chi_1, \chi_2, \lambda_1, \lambda_2$ — коэффициенты аппроксимации.

Значения этих коэффициентов приведены в табл. 2.2

Таблица 2.2.

Материал трубы	Значения коэффициентов			
	$\mu_\sigma = -1$		$\mu_\sigma = 0$	
	χ_1	λ_1	χ_2	λ_2
Сталь 20	2,85	-0,669	1,628	-0,695
Сталь 12 X18H10T	3,794	-0,504	2,601	-0,676
Сплав титана BT1-0	4,214	-0,848	1,298	-0,307

Графические зависимости, построенные по предложенной аппроксимирующей формуле, приведены на рис. 2.19.

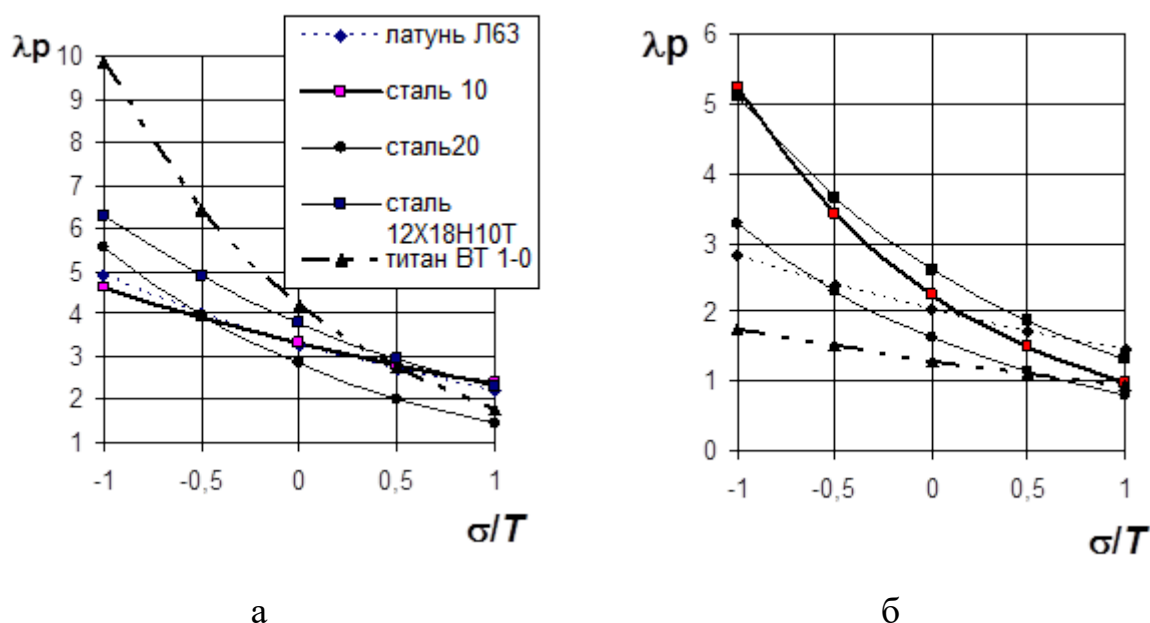


Рис. 2.19. Влияние показателя напряженного состояния на степень деформации до разрушения при различных значениях показателя Лоде: а – при $\mu_\sigma = -1$, б – для $\mu_\sigma = 0$.

Анализ этих зависимостей показывает, что при отрицательных значениях σ/T пластичность металла значительно возрастает. В соответствии с зависимостями (2.21) и (2.22) поврежденность металла за один переход волочения определяли, как сумму величин на входе и выходе из очага деформации и поврежденности частиц металла при прохождении ими очага

деформации, при этом показатель напряженного состояния приняли средней величины по очагу деформации [79].

При изучении поврежденности металла во многопереходных процессах с промежуточными отжигами приняли: накопленная степень деформации по переходам не суммируется, показатель напряженного состояния по переходам не зависит от предыдущего акта пластической деформации.

В том случае если рассматривается процесс, при котором промежуточный отжиг отсутствует, то степень деформации рассматривали в виде суммы по двум или более переходам, а величину поврежденности ω также суммировали. Кроме того, упругие деформации после предыдущего перехода не учитывали и размеры профиля принимали в последующем переходе теми же.

Предельное значение ω рекомендовано [80, 81] принимать в зависимости от степени ответственности готового профиля. В частности, если $\omega = 1$, то возникают видимые визуально трещины. Если $\omega = 0,6 \dots 0,7$, то даже после термообработки поврежденность не исчезает и наблюдается остаточная поврежденность. Наконец, при $\omega = 0,2 \dots 0,3$, поврежденность полностью исчезает после термообработки, и эту величину следует иметь для труб ответственного назначения [82].

2.4. Расчет усилия волочения труб с переменной толщиной стенки

Как показано выше, зависимостей для определения усилия волочения труб с переменной толщиной стенки на оправке к настоящему времени в литературе не приведено. Для решения этой задачи используем твердотельные модели процесса волочения ТПТС (см. раздел 2.1), а также обобщенную модель процессов волочения на неподвижной и подвижной оправках (рис. 2.20). Волочение ТПТС по условиям прочности стержня оправки возможно на неподвижной оправке до диаметра трубы $D_T \geq 15\text{мм}$. Для расширения сортамента ТПТС в меньшую сторону и волочения труб при $D_T < 15\text{мм}$ возможно применение самоустанавливающейся оправки (для ограниченного

Поставленные задачи решаем на основе энергетического метода построения уравнения полной мощности деформации. В этом случае возможен учет упрочнения металла при пластической деформации и изменения сил трения вдоль контактной поверхности рабочего инструмента.

80

$$P_B V_1 = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2.23)$$

где P_B – усилие волочения;

V_1 – скорость тягового органа,

$\sum_{i=1}^n N_i$ – сумма мощностей, рассеиваемых в очаге деформации.

Очаг деформации содержит зоны внеконтактной деформации на входе и выходе из геометрического очага деформации и объем металла, находящийся между указанными внеконтактными зонами, где происходит основная пластическая деформация. Внеконтактные зоны имеют, как правило, криволинейные очертания, их величина в радиальном направлении и протяженность зависят от геометрии рабочего инструмента, вытяжки, коэффициента трения и др. Поскольку точное описание внеконтактных зон весьма сложно, то в теории ОМД [27] принято их приближенное моделирование таким образом, что происходит срез металла по поверхностям входа и выхода в очаге деформации (см. точки A и B , рис. 2.20) и скорость радиального течения изменяется здесь скачком. Рассмотрим течение металла в очаге деформации, определим скорости течения и скорости деформации.

Текущее изменение наружного радиуса трубы вдоль очага деформации имеет вид:

$$r_x = r_0 - x \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.24)$$

Площадь поперечного сечения трубы будет

$$F_x = \pi[(r_0 - x \operatorname{tg} \alpha)^2 - r_{\text{оп}}^2]. \quad (2.25)$$

Тогда продольная скорость V_x перемещения металла в любом сечении очага деформации определяется из условия постоянства расхода секундных объемов металла в виде

$$V_x = V_0 \frac{r_0^2 - r_{\text{оп}}^2}{(r_0 - x \operatorname{tg} \alpha)^2 - r_{\text{оп}}^2}, \quad (2.26)$$

Условие несжимаемости, записанное через радиальную, окружную и осевую скорости деформации ξ_r, ξ_θ, ξ_x имеет вид [84]:

$$\xi_r + \xi_\theta + \xi_x = 0. \quad (2.27)$$

Связь скоростей течения и скоростей деформации находим в виде:

$$\xi_r = \frac{dV_r}{dr}; \xi_\theta = \frac{V_r}{r}; \xi_x = \frac{dV_x}{dx}. \quad (2.28)$$

Поставив (2.28) в (2.27), получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dV_r}{dr} + \frac{V_r}{r} + \frac{dV_x}{dx} = 0. \quad (2.29)$$

Решение этого уравнения при учете соотношения (2) позволяет найти после упрощения скорость радиального течения:

$$V_r = -\frac{V_0 r_0^2 r \operatorname{tg} \alpha}{(r_0 - x \operatorname{tg} \alpha)^3} \left(1 - \frac{r}{r_{\text{оп}}}\right). \quad (2.30)$$

Определим скорости радиального течения металла по линиям разрывов (точки А и В) при $x = 0$ и $x = l$, тогда получим

$$V_{r|x=0} = -V_0 \frac{r}{r_0} \operatorname{tg} \alpha \left(1 - \frac{r}{r_{\text{оп}}}\right). \quad (2.31)$$

$$V_{r|x=l} = -\frac{V_0 r_0^2 r \operatorname{tg} \alpha}{r_1^3} \left(1 - \frac{r}{r_{\text{оп}}}\right). \quad (2.32)$$

Полная мощность, рассеиваемая в очаге деформации, содержит сумму мощностей среза на входе и выходе из очага деформации, мощность сил контактного трения и мощность пластической деформации в геометрическом очаге деформации. Тогда вместо (2.23) запишем

$$\begin{aligned} PV_1 = & \sum_{i=1,2} \iint_{S_{\text{сп}}} \tau_{S_i} V_{\text{сп}i} dS_{\text{сп}i} + \iint_{S_{k_B}} \tau_{k_1} V_{k_1} dS_{k_1} \pm \\ & \pm \iint_{S_{k_2}} \tau_{k_2} V_{k_2} dS_{k_2} \pm \iiint_V T H dV. \end{aligned} \quad (2.33)$$

где τ_{S_i} , τ_{k_1} и τ_{k_2} - предел текучести металла на сдвиг в плоскостях среза ($i = 1, 2$) и контактные касательные напряжения на границе раздела металла и инструмента соответственно;

$V_{\text{сп}i}$ - величины радиального скачка скорости металла на линии разрыва скоростей;

$S_{cp_i}, S_{k_1}, S_{k_2}, V$ - площади среза, площади контакта металла с рабочим инструментом, и объем, охваченный пластической деформацией. В этой формуле знак “+” для неподвижной оправки, а знак “-“ - для подвижной.

Для определения мощности сил среза на входе в очаг деформации запишем:

$$N_{cp_1} = \int_0^{2\pi} \int_{r_{оп}}^{r_0} \tau_{S_0} V_{r|x=0} r dr d\Theta, \quad (2.34)$$

а на выходе

$$N_{cp_2} = \int_0^{2\pi} \int_{r_{оп}}^{r_1} \tau_{S_k} V_{r|x=l} r dr d\Theta, \quad (2.35)$$

где τ_{S_0} и τ_{S_k} - сопротивление пластической деформации металла на сдвиг в исходном состоянии и на выходе из очага деформации.

Величину текущего значения сопротивления деформации можно найти, принимая, что за переход волочения происходит упрочнение металла по линейному закону:

$$\tau_{S_x} = \tau_{S_0} [1 + (k - 1) x/l]. \quad (2.36)$$

Тогда, например, при $x = l$ будет $\tau_{S_k} = k \tau_{S_0}$, где k - коэффициент упрочнения металла.

Подставляя (2.31) и (2.32) в (2.34) и (2.35) и суммируя, получим

$$\begin{aligned} \sum_{i=1,2} N_{cp_i} &= \sum_{i=1,2} \iint_{S_{cp_i}} \tau_{S_i} V_{cp_i} dS_{cp_i} = \\ &= \frac{2}{3\sqrt{3}} \tau_{S_0} V_0 \pi r_0^2 \operatorname{tg} \alpha \left[\left(1 - \frac{r_{оп}^3}{r_0^3} \right) + k \left(1 - \frac{r_{оп}^3}{r_1^3} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Находим мощность сил трения на контактной поверхности трубы и волоки в виде:

$$N_{k_1} = \int_0^{2\pi} \int_0^l \tau_{k_1} r_x V_{k_1} \frac{dx}{\cos \alpha} d\Theta, \quad (2.38)$$

где τ_{k_1} - текущее значение контактного напряжения трения;
 V_{k_1} - скорость течения металла вдоль контактной поверхности "металл - инструмент".

В очаге деформации при волочении труб возникают значительные контактные давления. В этом случае величину контактных сил трения находим, используя закон Зибеля: $\tau_{kx} = f \sigma_{sx}$, причем f - коэффициент контактного трения, σ_{sx} - предел текучести материала. Скорость течения V_{kx} определим из равенства:

$$V_{k_1} = \frac{V_x}{\cos \alpha} = V_0 \frac{r_0^2 - r_{\text{оп}}^2}{[(r_0 - x \operatorname{tg} \alpha)^2 - r_{\text{оп}}^2] \cos \alpha}. \quad (2.39)$$

Решение по использованному методу может быть получено при условии, что коэффициенты трения и контактные давления на поверхностях волокна и оправки различны.

Подставив (2.39) и (2.24) в (2.38) имеем окончательно

$$N_{k_1} = f_1 \sigma_{s_0} (1 + k_1) V_0 \pi r_0^2 \frac{(1 - r_{\text{оп}}^2 / r_0^2)}{\sin \alpha \cos \alpha} \ln \frac{r_0}{r_1}. \quad (2.40)$$

Далее находим мощность сил контактного трения на поверхности труба – оправка

$$N_{k_1} = \int_0^{2\pi} \int_0^l \tau_{k_2} r_{\text{оп}} V_{k_2} dx d\Theta. \quad (2.41)$$

Подставляя все величины, получим

$$N_{k_2} = f_2 \sigma_{s_0} (1 + k_2) V_0 \pi r_0^2 r_{\text{оп}} \left(1 - \frac{r_{\text{оп}}^2}{r_0^2} \right) \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \frac{r_0 - r_1}{r_0 r_1}. \quad (2.42)$$

Рост контактной поверхности очага деформации профильной трубы в сравнении с круглой трубой учтем по методу увеличенного коэффициента внешнего трения, вводя коэффициент A по формуле (1.13) или (1.14) для мощности контактного трения «труба-волока» для случая наружного профилирования или «труба-оправка» при внутреннем профилировании (1.17).

При определении мощности внутренних сопротивлений примем условие пластичности Мизеса $T = \tau_s$. Находим, используя зависимости (2.28), (2.29) и (2.30), компоненты скоростей деформации сдвига. Вычислим, например, ξ_r в виде

$$\xi_r = \frac{dV_r}{dr} = -V_0 r_0^2 \frac{tg \alpha}{(r_0 - x tg \alpha)^3} \left(1 - \frac{2r}{r_{оп}}\right). \quad (2.43)$$

Аналогично определим ξ_θ и ξ_x . Интенсивность скоростей деформаций сдвига определим, используя зависимость [41]:

$$H = \sqrt{\frac{2}{3} [(\xi_r - \xi_\theta)^2 + (\xi_\theta - \xi_x)^2 + (\xi_x - \xi_r)^2]}. \quad (2.44)$$

С учетом осевой симметрии очага деформации и равенств $\xi_\theta = \xi_r$, можно получить [84]:

$$H = V_0 r_0^2 tg \alpha \left[\frac{\left(12 + 9\bar{r}^2 \frac{tg \alpha}{r_0}\right) \left(1 - \frac{2r}{r_{оп}}\right)^2}{(r_0 - x tg \alpha)^6} \right]^{0,5}, \quad (2.45)$$

где $\bar{r} = r \big|_{x=0}$.

Для мощности внутренних сопротивлений запишем

$$N_B = \int_0^{2\pi} \int_0^l \int_{r_{оп}}^{r_x} \tau_{sx} H r dr d\theta dx. \quad (2.46)$$

Решение выполняем, рассматривая волочение без противонапряжения.

Необходимые подстановки зависимостей T и H в (2.46) позволяют найти:

$$N_B = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau_{s_0} (1 + k) V_0 \pi r_0^2 \left(\ln \frac{r_0}{r_1} - r_{оп}^2 \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_1^2 r_0^2} \right). \quad (2.47)$$

Полную мощность PV_1 получаем, суммируя (2.37), (2.42) и (2.47). Кроме того, учтем равенства $F_H = \pi r_0^2$, $F_k = \frac{F_H}{\mu}$, $V_0 = \frac{V_1}{\mu}$. Для случая $f_1 = f_2 = f$ и $k_1 = k_2 = k$ получим окончательно:

$$\begin{aligned}
N = & \frac{2}{3\sqrt{3}} \tau_{s_0} V_1 F_k \operatorname{tg} \alpha \left[\left(1 - \frac{r_{\text{оп}}^3}{r_0^3} \right) + k \left(1 - \frac{r_{\text{оп}}^3}{r_1^3} \right) \right] + \\
& + \psi \sigma_s (1 + k) V_1 F_k \left(1 - \frac{r_{\text{оп}}^2}{r_0^2} \right) \left[\frac{\ln(r_0/r_1)}{\sin \alpha \cos \alpha} \pm \frac{r_{\text{оп}}}{\operatorname{tg} \alpha} \frac{r_0 - r_1}{r_0 r_1} \right] + \\
& + \frac{\sqrt{3}}{2} \tau_{s_0} (1 + k) V_1 F_k \left(\ln \frac{r_0}{r_1} - r_{\text{оп}}^2 \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_1^2 r_0^2} \right).
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Определение мощности волочения позволяет, с учетом производительности процесса, оценивать удельные энергозатраты [84]. Усилие волочения P находим как отношение выражения (2.48) к скорости переднего конца прутка V_1 , а продольное напряжение волочения находим в виде: $\sigma_{\text{вол}} = \frac{P}{F_k}$. Формулы для P и $\sigma_{\text{вол}}$ корректировали по методу [21] для круглых профилей. Коэффициент запаса прочности переднего конца трубы находим:

$$K_3 = \frac{\sigma_{\text{вол}}}{\sigma_{s_0} (1 + k)}. \tag{2.49}$$

Полученные соотношения позволяют, в частности, найти также угол конусности волокна, оптимальный по усилию волочения из уравнения $\frac{\partial P}{\partial \alpha} = 0$.

Численные расчеты по этому уравнению показывают, что величина оптимального угла волокна лежит в пределах $\alpha = 8..10^\circ$ и зависит от свойств протягиваемого материала, коэффициента трения, вытяжки. Это позволяет для конкретных условий волочения выбирать значение оптимального угла волокна.

2.5. Основы расчета напряженно – деформированного состояния металла методом конечных элементов

Полученные геометрические модели процесса волочения труб с переменной толщиной стенки являются объемными и описываются системой уравнений теории пластичности в частных производных. При этом уравнения связи напряжений и деформаций являются нелинейными. В настоящее время точное решение такой задачи не представляется возможным, поэтому необходимо использовать приближенные численные методы решения [40, 41],

среди которых в первую очередь метод конечных элементов [85]. Основа этого метода заключается в том, что очаг деформации представляется в виде множества подобластей, в каждой из которых деформация металла описывается набором выбранных функций, представляющих напряжения и перемещения в данном множестве. Поскольку эти функции выбраны в виде степенных полиномов, то вычисления становятся достаточно простыми [86, 87]. С математической точки зрения метод конечных элементов является обобщением методом Ритца и Бубнова – Галеркина [88-91].

Основное уравнение МКЭ может быть получено следующим образом. Полная система зависимостей, описывающая поведение сплошной среды обобщается вариационным уравнением вида [40]

$$\delta \left\{ \iiint_V \left[\int_0^{\Gamma} T(\gamma) d\gamma \right] dV - \iint_S p_i U_i dS \right\} = 0, \quad (2.50)$$

где Γ – накопленная степень деформации сдвига,
 γ – переменная интегрирования.

Из этого уравнения следует, что вариации работ внешних A_{θ} и внутренних сил $A_{\theta n}$ равны, т.е.

$$\delta A_{\theta n} = \delta A_{\theta}. \quad (2.51)$$

Вариация работы внутренних сил имеет вид [92]:

$$\delta A_{\theta n} = \iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV, \quad (2.52)$$

где $\{\delta \varepsilon\}$ - вариация вектора деформации; $\{\sigma\}$ - вектор напряжений.

Каждая из этих величин определяется как вектор – столбец вариации деформации и вектор-столбец напряжений, записанных в виде компонентов этих величин в выбранной системе координат.

Кроме того, деформации выражаются через перемещения, например, в виде равенств Коши:

$$\{\varepsilon\} = [D]\{U_V\}, \quad (2.53)$$

где $[D]$ - матрица дифференцирования;

$\{U_V\}$ - перемещения точек объема.

В свою очередь, равенство (2.53) можно записать через перемещения узлов рассматриваемого элемента

$$\{\varepsilon\} = [D][N]\{U\} = [B]\{U\}. \quad (2.54)$$

Окончательно будем иметь

$$\delta A_{en} = \{\delta U\}^T \left(\iiint_V [B]^T [C][B] dV \right) \{U\}, \quad (2.55)$$

где $[C]$ - матрица свойств материала, устанавливающая связь напряжений и деформаций.

Вариация работы сил удельного давления

$$\delta A_e = \int_S \{\delta U_V\}^T \{p\} dS, \quad (2.56)$$

где $\{p\}$ - вектор распределенной нагрузки.

Проведя здесь аналогичные замены, подставим δA_{en} и δA_e в уравнение (2.51).

Основное уравнение, используемое при расчете методом конечных элементов, имеет вид:

$$[K]\{U\} = \{P\}, \quad (2.57)$$

где $[K]$ - глобальная матрица механических свойств ансамбля конечных элементов;

$\{U\}$ - вектор – столбец узловых перемещений системы;

$\{P\}$ - вектор – столбец узловых сил.

Коэффициенты матрицы механических свойств материалов для объемного случая являются компонентами четырехвалентного тензора K_{ijkl} , причем для изотропного материала выполняются следующие свойства симметрии: $K_{ijkl} = K_{jikl} = K_{ijlk} = K_{klij}$. Выражение (2.57) имеет ясный физический смысл, заключающийся в том, что сила, вызванное ей перемещение и свойства среды связаны между собой.

В развернутой форме для всего тела после суммирования по всем элементам будем иметь для $[K]$ и $[P]$ следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} [K] &= \sum_{m=1}^M \iiint_V [B]^T [C] [B] dV; \\ [P] &= \sum_{m=1}^M \iint_S [N]^T \{p\} dS; \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

Имеющееся большое количество программных реализаций метода МКЭ, например, COSMOS/M, NASTRAN, ALGOR, ANSYS, DEFORM [92-95] и их модификации отличаются друг от друга способом реализации выписанных выше уравнений. Для примера рассмотрим последовательность решения, принятую в пакете ANSYS [96]. В этой программе алгоритм пошаговой процедуры реализации кратко выглядит так:

1. Вычисляются исходные или текущие значения механических свойств материала.

2. На основе заданного перемещения границы рассматриваемой области (например, передний конец трубы при волочении или задний конец – при проталкивании) находятся текущие значения деформаций.

3. Используя физические уравнения связи напряжений и деформаций, находим компоненты напряжений, а также интенсивность напряжений. Затем на основе критерия Мизеса производим ее сравнение с пределом текучести, который вычисляется с учетом упрочнения материала.

4. В том случае, когда указанный выше критерий выполняется, то вычисляется множитель, устанавливающий связь между приращениями пластических деформаций и функцией напряжений, определяющей направление пластических деформаций.

5. На каждом новом шаге перемещения границы вновь производится расчет механических переменных очага деформации по процедуре п.п. 1..5 и т.д. [96].

Конечно – элементный метод решения задач пластичности в последнее время успешно применен для решения многих задач пластической деформации. В частности, на этой основе исследованы такие задачи трубного производства, как безоправочное волочение круглых труб [97], деформация трубной заготовки в процессе винтового обжата [98], процесс обжата тонкостенных и толстостенных труб [99] и др., а также процессы штамповки [100] и др. Метод МКЭ является весьма эффективным, но требует в каждом конкретном случае оценки точности и экспериментальной проверки [101].

2.6. Допущения моделей

С целью упрощения конечно – элементного описания процессов деформации введены следующие допущения моделей:

1. Профильные оправки и волокна считаем недеформируемыми;
2. Поверхность профильных волокон на соответствующих участках рабочего конуса считается имеющей постоянный угол наклона к оси волочения;
3. Материал трубной заготовки принят изотропным;
4. Закон упрочнения металла в процессе деформации принят нелинейным в виде степенной зависимости напряжений и деформаций;
5. По поверхностям трения «труба-волокна» и «труба – оправка» закон трения одинаков;
6. Силы контактного трения приняты в виде закона Зибеля – пропорциональным пределу текучести материала.

2.7. Выводы по главе 2

1. Для описания процесса оправочного волочения труб с переменной толщиной стенки необходима разработка комплексных моделей, включающих, в частности, геометрические модели очага деформации, учитывающие калибровку рабочего инструмента;
2. Геометрические модели очага деформации следует разрабатывать отдельно от для случаев наружного или внутреннего профилирования, а также первого и промежуточных переходов волочения. Эти модели имеют пространственную форму и плоскостную симметрию;
3. Автоматизированная система выбора размеров трубной заготовки, а также поиска конфигурации и размеров труб на промежуточных переходах должна основываться на учете особенностей течения металла и стандартных размерах заготовки;
4. Построение с использованием компьютерной графики линий тока металла, ортогональных исходному (заготовка) и конечному профилям трубы, а также эквипотенциалей, ортогональных линиям тока, позволяет определить конфигурацию инструмента для изготовления промежуточных переходов и построить калибровку рабочего инструмента для поперечных сечений труб в виде правильных многоугольников и для криволинейных профилей. При этом использование β – сплайнов Безье для указанного выше построения удовлетворяет граничным условиям контуров профиля и принципу наименьшего действия;
5. Деление линий тока на части, пропорциональные вытяжкам по переходам, позволяет при построении эквипотенциалей описать входное и выходное сечения инструмента на заданном переходе волочения;
6. Для построения рабочей поверхности волочильного инструмента следует использовать регулярные коноиды при изучении сечений в виде правильных многоугольников и цилиндroidы при изучении криволинейных профилей;

7. Описание комплексной модели очага деформации следует производить с использованием полной системы уравнений теории пластичности для пространственного случая, включающей уравнения равновесия, соотношения Коши и физические уравнения связи напряжений и деформаций с учетом упрочнения металла и контактных сил трения;
8. Определение напряженно – деформированного состояния металла при волочении труб с переменной толщиной стенки необходимо дополнить моделью расчета поврежденности, в частности, для интенсивно упрочняющихся материалов с пониженной пластичностью и для многопереходных процессов волочения.
9. Использование энергетических соотношений теории пластичности дает возможность определить напряжения волочения труб с переменной толщиной стенки с учетом различия коэффициентов трения и упрочнения металла на поверхностях контакта металла с волокой и оправками неподвижного и подвижного типов.
10. Сложное геометрическое и математическое описание комплексной модели очага деформации приводит к необходимости использования универсального метода решения задач теории пластической деформации – метода конечных элементов.

ГЛАВА 3. НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОВРЕЖДЕННОСТЬ МЕТАЛЛА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ТРУБ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ

Варьирование параметрами процесса деформации и рабочего инструмента на производстве и в экспериментах весьма трудоемко и зачастую практически невозможно. Применение теоретического исследования позволяет проще определить рациональные условия процесс.

Рассмотрены этапы построения конечно – элементной модели очага деформации, основой которой является предложенная твердотельная модель. Рассмотрена процедура создания модели канала волокна сложной формы, объема корпуса волокна и оправки, моделирование трубной заготовки, задание симметрии, вида конечных элементов и граничных условий. Проведен анализ влияния параметров процесса на механические переменные очага деформации и поврежденность материала при волочении.

Решение выполнено на примере изучения процесса волочения круглых труб – заготовок в шестигранную волоку с применением неподвижной цилиндрической оправки. Рассмотрена также задача деформации трубы на неподвижной оправке с приложением рабочего усилия к заднему концу трубы (проталкивание). При этом изучено влияние на процесс контактного трения и марки материала заготовки.

3.1. Построение конечно – элементного аналога моделей очага деформации

Создание конечно – элементной модели (КЭМ) процесса оправочного волочения включает ряд этапов:

1. Создание твердотельной модели канала волокна.

При помощи системы трёхмерного моделирования Компас [102] создается модель, соответствующая форме и размерам канала волокна. Моделирование начинается с задания участка в виде усеченной пирамиды или

конуса, соответствующего рабочему (профилирующему) участку волокни. Затем к полученному участку пристраивается суммированием калибрующий участок, заходный и выходной участки (чаще всего выполненные в виде скруглений заданного радиуса). Размеры этих участков таковы, что обеспечивается прохождение заготовки трубы непосредственно до профилирующего участка, где и происходит первичный контакт инструмента и заготовки. Расчет исходных размеров инструмента в первом приближении может быть произведен на основании типичных значений вытяжки трубы в продольном направлении. Типичное значение периметра конечной трубы на 1-5% превышает таковой для трубной заготовки.

2. Построение объемной модели корпуса волокни.

Производится построение цилиндра с высотой, соответствующей высоте трехмерной модели канала волокни и произвольным диаметром (для недеформируемого инструмента). Следует избегать создания волокни со слишком тонкой стенкой (что измельчает размер элементов и увеличивает их количество сверх необходимости) или со слишком толстой стенкой (что также повышает количество элементов). Представляется рациональным задание диаметра корпуса волокни приблизительно равным двум диаметрам описанной окружности канала волокни.

3. Создание трехмерной модели волокни.

Производится относительное позиционирование моделей канала и корпуса волокни до обеспечения соосности этих тел, а также совпадения их торцевых плоскостей, после чего осуществляется булева операция вычитания, результатом которой становится цилиндр с профильным отверстием – модель волокни. При условии моделирования недеформируемой волокни рассматривалась ее модель, представляющая собой лишь контактные ее поверхности (форму внутреннего канала). Такое моделирование позволяло сберечь время решения без потери его точности.

4. Создание трехмерной модели оправки.

В зависимости от типа моделируемой оправки производится создание объема модели [103] оправки путем суммирования тел-примитивов соответствующей формы (чаще всего, цилиндров и многогранных призм). После завершения этих операций добавляются скругления для моделирования необходимых заходных и переходных радиусов.

5. Задание симметрии задачи

Моделируемые задачи обладают плоскостной симметрией, причем степень симметрии зависит от количества лучей получаемой трубы и соответствующей формы инструмента. При этом практика профилирования показывает, что значительного течения металла относительно плоскостей симметрии не происходит. Сказанное позволяет разбить задачу [104] (инструменты и заготовку) на угловые секторы вдоль оси волочения. Таким образом, для шестилучевой трубы рассматривается лишь 30° сектор инструментов и трубы, представляющий $1/12$ решаемой задачи (половину одного из лучей профиля) (рис. 3.1).

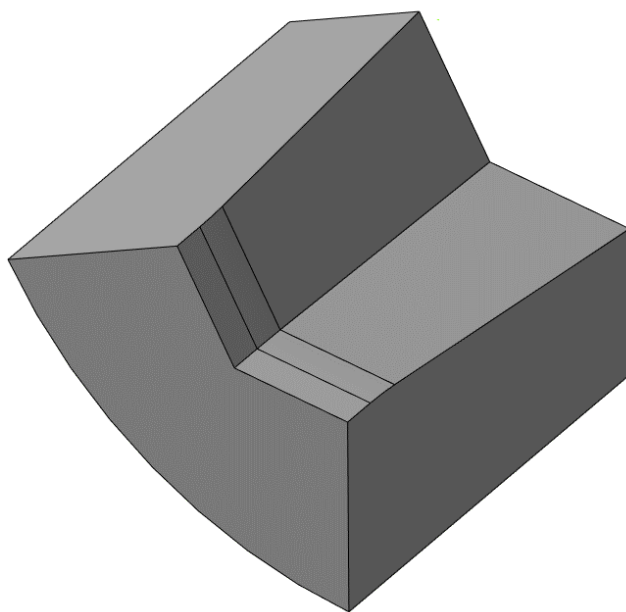


Рис.3.1. Твёрдотельная модель волокна с шестигранным каналом, профилирующим и калибрующим участками и радиальным переходом между ними. Модель построена с учетом симметрии задачи.

6. Передача моделей в конечно-элементный пакет.

В системе твердотельного моделирования формируются файлы в формате IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Преимуществами данного формата является его векторная природа, что позволяет производить передачу с абсолютной точностью (при создании модели из стандартных геометрических примитивов), а также распространенность программного обеспечения для просмотра и промежуточного редактирования этих файлов.

Оба использованных пакета (Компас-3D и Ansys) имеют возможность транслирования в указанный формат [105].

7. Проверка и корректировка геометрической модели.

Выполняется проверка геометрии трехмерной модели с устранением ошибок и погрешностей модели, таких, как вырожденные участки, дефекты «склейки» поверхностей, если это необходимо - модель упрощается. Первичный поиск дефектов производится в автоматическом режиме с использованием системы Ansys DesignModeler, в частности, опций меню Repair.

8. Моделирование трубной заготовки.

Гладкая трубная заготовка моделируется в пакете при помощи задания примитива полого цилиндра соответствующих размеров. Процесс многостадийного волочения требует задания трубной заготовки профильной формы, что может быть обеспечено двумя способами – моделированием заготовки по данным расчетов геометрии трубы для предыдущего шага, либо последовательным размещением нескольких моделей волок с профилированием за один ход волочения. При этом расстояние между моделями волок задается таким, чтобы модель трубы полностью покидала предыдущую волоку перед контактом со следующей. Такое расположение полностью исключает взаимовлияние процессов профилирования в последовательных волокнах.

Последний способ моделирования является предпочтительным по точности, что накладывает некоторое ограничение на длину модели трубной

заготовки ввиду необходимости обеспечения приемлемого времени решения. Рациональной представляется длина модели трубы до 10 ее диаметров, что позволяет выделить, кроме переднего и заднего участков профиля на трубе также и участок установившегося профиля.

9. Взаимное позиционирование моделей инструмента и заготовки.

Предполагается, что для экономии количества шагов решения трубная заготовка располагается напротив входа в волоку таким образом, что ее передний конец находится на минимальном расстоянии от нее (рис. 3.2). Для устранения зазора может использоваться автоматическая опция Close Gap.

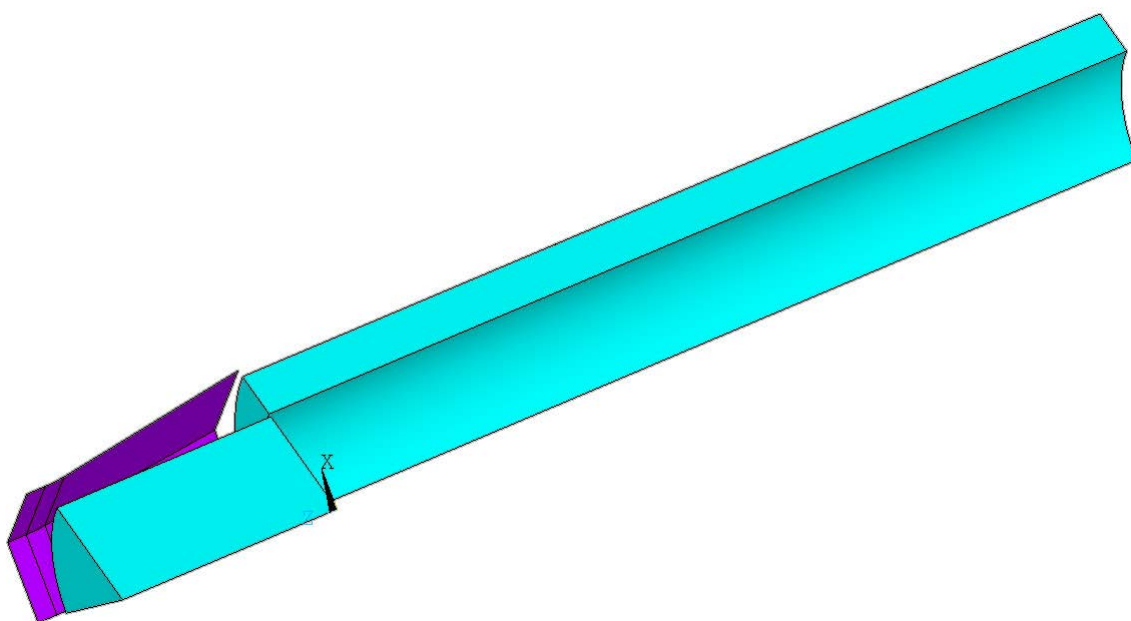


Рис. 3.2. Корректно позиционированные модели трубы, волоки и оправки в исходном состоянии.

10. Задание вида конечных элементов.

Описываемые в конечно-элементной постановке формы твердотельных моделей являются криволинейными, что предъявляет повышенные требования к точности разбивки (в частности, от разбивки зависит точность передачи исходной геометрии и «гладкость» контактных поверхностей). Существующие нелинейности (контакта и свойств материала) также осложняют задачу. Для экономии количества элементов, и связанного с этим

параметром времени решения задачи было решено использовать адаптивную сетку со значительно меняющейся плотностью сетки, что требует отказа от упорядоченной и перехода к произвольной сетке. Наиболее подходящим типом элементов в этом случае представляются тетраэдры с промежуточными узлами. Согласно источнику [104], этот тип элементов имеет точность, близкую к таковой для четырехузловых прямоугольных элементов. Отмечается также, что важной является геометрия отдельных конечных элементов, в частности, величина соотношения сторон элементов. Следует придерживаться сетки такого вида, при которой указанные стороны имеют максимально близкие длины, что позволяет избежать потери точности решения.

На основании вышесказанного был выбран тип элемента Solid187, трехмерный элемент для задач механики деформируемого твердого тела, с десятью узлами, имеющий квадратичное представление перемещений и предназначенный для нерегулярной формы сетки (рис. 3.3). Элемент имеет 10 узлов, с 3 степенями свободы в каждом, может применяться для определения пластичности, сверхупругости, ползучести, изменения жесткости при нагружении, учета больших перемещений, упругопластического анализа.

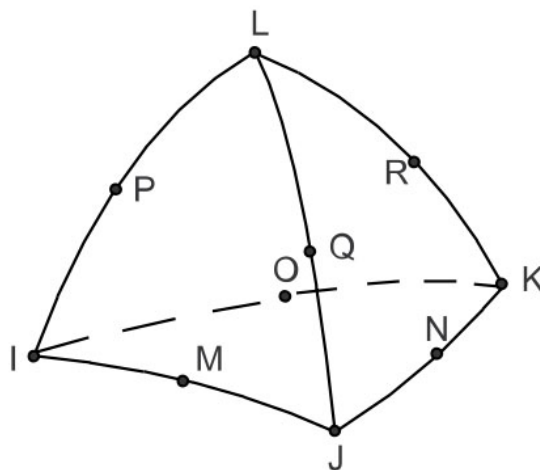


Рис. 3.3. Внешний вид конечных элементов типа Solid187.

Для разбивки моделей поверхностей контакта (при моделировании волокна в виде набора поверхностей контакта) использовались оболочечные элементы типа Shell181.

11. Задание свойств материала инструмента и заготовки.

Значительные величины перемещения от пружинения заготовки при натурном моделировании определяют упругопластический характер поведения материала. В этой связи задание свойств производится в виде мультилинейной (кусочной) кривой с кинематическим упрочнением (рис. 3.4). Кривая отражает связь напряжений и деформаций при растяжении, и может быть построена на основе натуральных испытаний образца. Принят процесс холодной деформации, поскольку из-за невысокой скорости течения процесса не происходит значительного разогрева материала от деформации. Вышесказанное позволяет строить лишь одну кривую упрочнения для материала трубной заготовки, соответствующую комнатной температуре деформации. В то же время, нелинейность модели позволяет говорить, что учет упрочнения материала динамически меняет свойства материала по отдельным элементам модели, что приводит к появлению модели готовой трубы, отдельные части которой имеют свойства, резко отличающиеся от других (упрочненные деформацией).

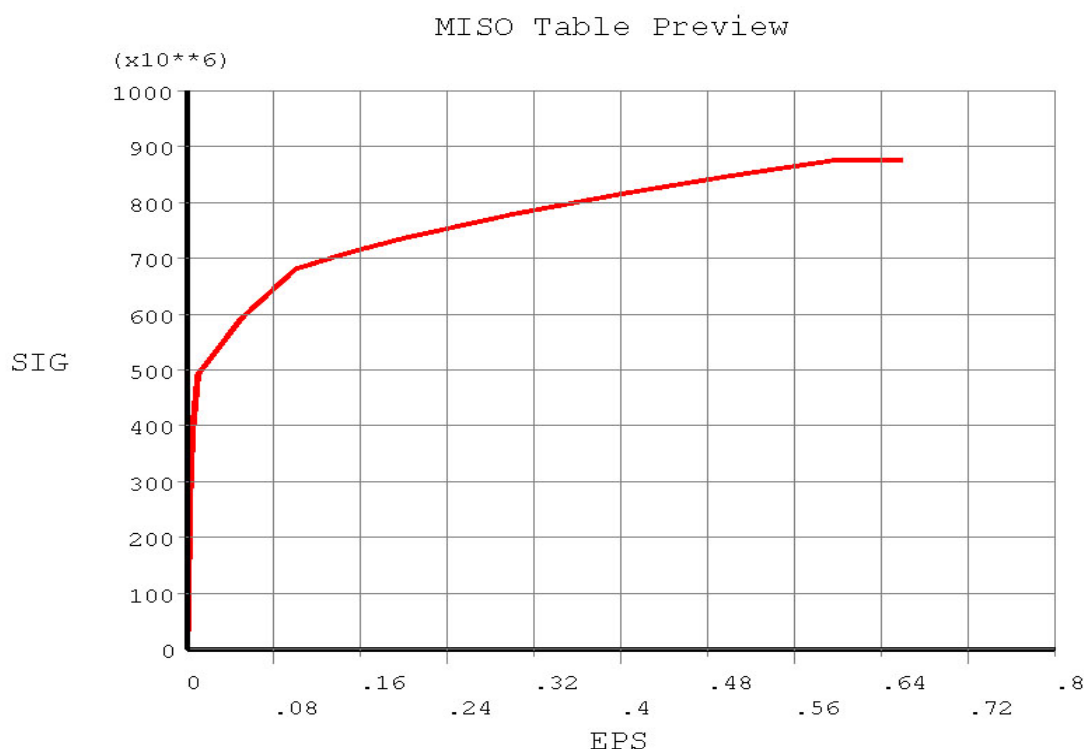


Рис. 3.4. Вид кривой упрочнения для материала трубы.

Материал волоки для большинства задач принимается недеформируемым, что для практики волочения соответствует применению волок из твердого сплава или закаленных стальных (при профилировании труб из цветных металлов).

12. Разбивка моделей на конечные элементы.

С целью разбивки задаются параметры алгоритма работы сеточного генератора, на избранных элементах модели (чаще всего - поверхностях контакта) задаются зоны локального повышения плотности сетки. После этого производится разбивка в автоматическом режиме, причем сеточный генератор выбирает плотность сетки по размерам разбиваемых элементов модели. Такой принцип в первом приближении позволяет добиться приемлемой точности отображения исходной модели.

Для относительно сложной модели инструмента может быть рекомендован метод разбивки с триангуляцией Делоне, который, в отличие от триангуляции по методике восьмеричного дерева (иначе – метод граничной коррекции), дает более сглаженные переходы плотности сетки, что благоприятно сказывается на гладкости переходных поверхностей полученной модели. Используется генератор сетки типа Patch-conforming, причем для локального измельчения сетки использует метод продвижения фронта (Advancing Front). При этом производится начальная триангуляция границы области разбивки, описывающая ее геометрию с заданной точностью, после чего из заданной области разбивки последовательно изымают фрагменты в форме тетраэдров до тех пор, пока не исчерпают всю область. Триангулированная граница и является фронтом, используя треугольники из которого, строятся тетраэдры. Четвертой вершиной тетраэдра при этом принимается другая вершина фронта или дополнительный узел внутри заданной области. Таким образом, фронт разбивки продвигается по разбиваемому объему.

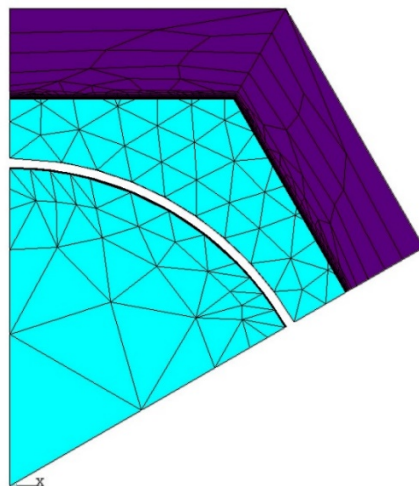


Рис. 3.5. Визуальная оценка «гладкости» разбивки.

Далее производится ручная корректировка сетки с тщательным просмотром отдельных элементов модели – мелких скруглений, переходов скруглений в плоские поверхности, стыков поверхностей. Отметим, что существуют случаи (например, предварительные и оптимизационные расчеты), при которых осуществляется многократное решение задачи с частым изменением геометрии. В этих случаях может потребоваться загромождение сетки на элементах модели с простой геометрией с целью снижения общего времени решения.

В общем случае, для корректировки (обычно, локального сгущения) сетки используются следующие постулаты:

а) «гладкость» криволинейных поверхностей – визуальная, или оцененная автоматически, по максимальному отклонению от исходной поверхности (рис. 3.5).

б) достаточное количество элементов в «зонах интереса», то есть зонах, где производится определение тех или иных величин. Если требуется – выполняется местное сгущение. (рис. 3.6).

В частности, если определяется распределение величины по толщине стенки трубы, то количество элементов или узлов определяет количество точек выявления требуемых параметров. В среднем, с использованием

адаптивной сетки общее количество элементов составляло около 250-300 тыс. элементов для оправочного профилирования.

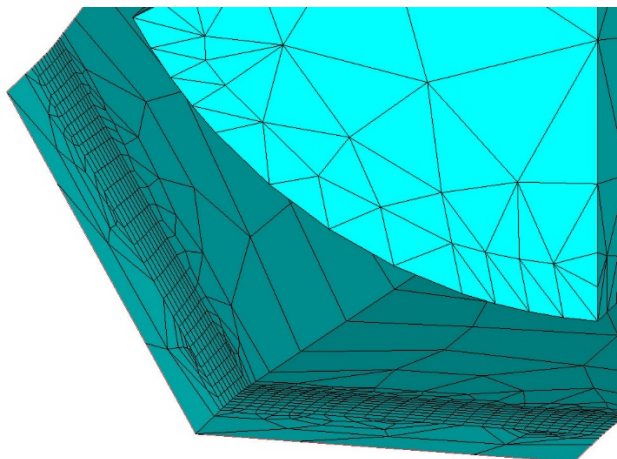


Рис. 3.6. Локальное сгущение конечно-элементной сетки в зоне волоочильного канала с переходным радиусом.

13. Задание граничных условий.

Усилие профилирования для конкретной задачи с неизвестной формой очага деформации является не определенным заранее, поэтому задача решается в заданных перемещениях, которые задаются такими, чтобы обеспечить полное прохождения отрезка трубы до выхода из канала волокна. В этой связи граничные условия включают систему степеней свободы для трубы и инструмента. Модели инструмента приняты недеформируемыми и не перемещаемыми, поэтому для всего из объема заданы нулевые перемещения по всем трем координатным осям.

Для задания статически определимой задачи требуется приложение определенного, нулевого или ненулевого перемещения по всем трем осям хотя бы в одной точке модели трубы. Была выбрана модель задания перемещений, при которой к переднему концу трубы прикладываются рабочее перемещение (моделирующее воздействие волоочильного стана), а перемещения по двум другим осям задаются указанием плоскостей симметрии задачи. Для этого полную геометрию задачи ранее разбили на секторы, и указали торцевые плоскости секторов в качестве плоскостей симметрии. При этом принимается

допущение, что не происходит перпендикулярного перемещения материала в плоскостях симметрии.

14. Задание контактного взаимодействия.

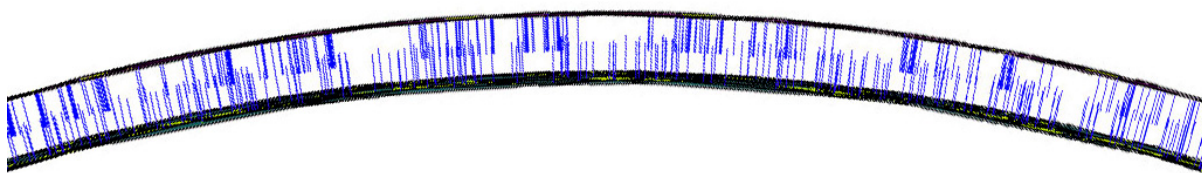
Поскольку размеры площадок контакта зависят от величины деформации трубной заготовки, то задача их отыскания является нелинейной и производится за несколько шагов методом итераций [106].

Задание контактного взаимодействия включает:

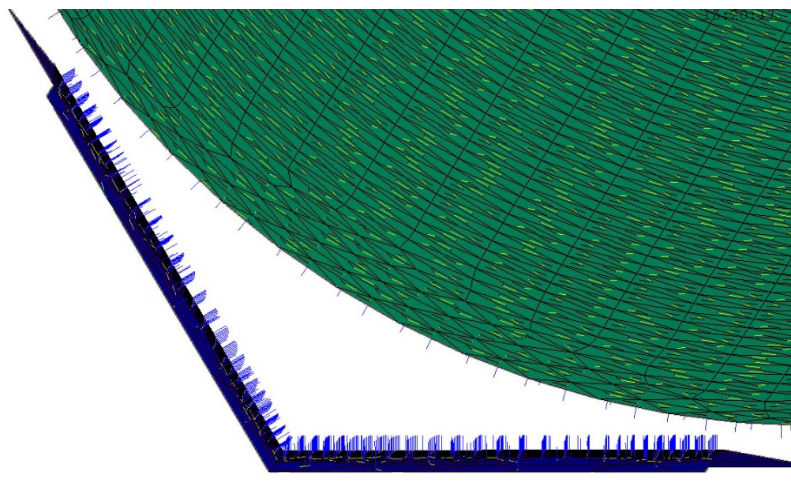
- Определение контактных пар;
- Задание целевой (Target) и контактной (Contact) поверхностей;
- Определение вида контакта (связанный, без разделения, с трением (задается показатель трения, определяемый по результатам эксперимента либо взятый из справочника), без трения);

По рекомендациям производителя для контакта объемных моделей инструмента и заготовки задается тип контактных пар «поверхность-поверхность», контактирующие тела – деформируемые (flexible), поверхности волоки и оправки принимаются в качестве целевой поверхности, наружная поверхность трубы – в качестве контактной. Задание производится с помощью модуля Contact Wizard, который и устанавливает большую часть констант контактной пары.

При профилировании волочением на оправке задаются две контактные пары – между волокой и наружной поверхностью трубы и между оправкой и внутренней поверхностью трубы. При этом производится проверка направления векторов контакта, которые должны быть расположены снаружи контактных и целевых поверхностей по направлению друг к другу (рис. 3.7, 3.8).



*Рис. 3.7. Расположение вектор – нормалей контакта на конечно –
элементных моделях оправки и трубы.*



*Рис. 3.8. Расположение вектор – нормалей контакта на конечно –
элементных моделях волокна и трубы.*

15. Решение задачи.

Задача может содержать несколько нелинейностей, в частности, две пары контактных поверхностей, упругопластические свойства материала. Согласно руководству, решение в этом случае производится со включенной опцией учета больших перемещений. Важным моментом является выбор количества шагов решения – общей рекомендацией здесь является то, что перемещение каждого из узлов на каждом из шагов (при наличии и отсутствии контакта тел, в начале и при развитии деформации трубы) не должно превышать 0,001 общего перемещения.

При этом на первом этапе решения задаются минимум два шага по перемещению таким образом, чтобы на первом произвести лишь упругое решение, а максимальное значение напряжения получить около 90% от

предела текучести. Такой расчет производится для определения перемещения, соответствующего напряжению в 90% от предела текучести. На следующих шагах задается количество подшагов (substeps), необходимого для получения сходимости решения. При этом важно, чтобы максимальные значения пластических деформации в каждом из элементов, не выходили за границы заданной кривой упрочнения, поскольку решатель не экстраполирует кривую для, а продлевает ее горизонтально без учета упрочнения.

Превышение этой величины над заданным пределом может свидетельствовать об ошибочно малом количестве подшагов решения, либо о неправильной разбивке модели трубы.

16. Постпроцессорная обработка и анализ результатов решения.

На основании построенной решателем базы данных при помощи общего постпроцессора производится комплексная обработка поузловых результатов. Может быть выбран один из нескольких видов представления результатов, среди которых одними из наиболее наглядных являются цветные эпюры-карты распределения результата по поверхности модели. В то же время этот способ не является достаточно точным и может служить лишь для оценки схемы распределения искомой величины.

Таким же наглядным, но косвенным способом отображения является анимация, позволяющая проследить, например, траекторию течения металла.

Для определения величин в конкретных узлах может быть рекомендован табличный тип определения, для которого требуется определение номера конкретного узла и соотнесение его с таблицей.

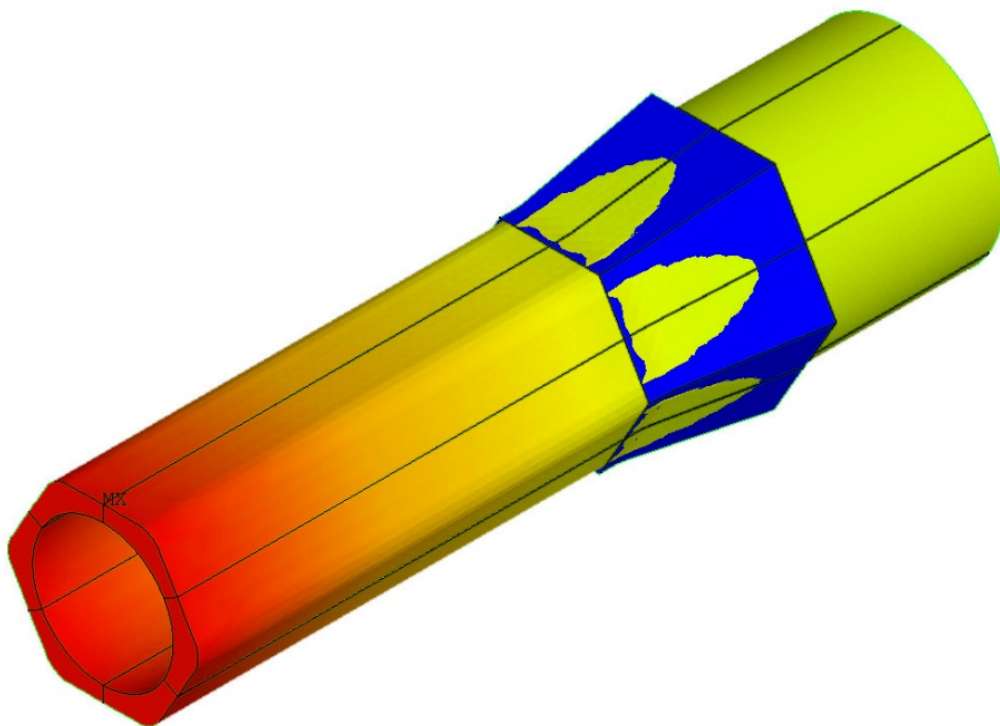


Рис. 3.9. Внешний вид модели и форма готовой трубы по завершению расчета (произведена достройка модели с учетом симметрии).

Для наглядного представления полученных результатов решения использована достройка модели с учетом симметрии (рис. 3.9) - (6-кратное повторение, угол элемента - 60° , в полярных координатах [59]).

В общем случае пакет позволяет определить или вычислить:

1. Перемещения отдельных узлов конечно – элементной модели и форму готового изделия, а также связанные с эти величины деформаций и возникающие напряжения (компоненты и интенсивность).
2. Гидростатическое давление в точках и удельное давление на контакте трубы и волокна.
3. Работу пластической деформации, а также показатель напряженного состояния σ/T .
4. Величину поврежденности ω .

3.2. Особенности формоизменения и течения металла при волочении ТПТС на оправке и деформированное состояние металла

3.2.1. Формоизменение металла

Основным отличием очага деформации при волочении некруглых труб с переменной по периметру толщиной стенки от волочения круглых труб при прочих одинаковых условиях процесса (вытяжка, длина пластической зоны, напряжения, контактное трение и др.) является несимметричность течения металла относительно оси волочения. Это приводит к увеличению неравномерности деформации, возникновению дополнительных сдвигов в разных направлениях контактной поверхности и продольных напряжений. Указанные особенности определяются сложностью формы профиля и степенью отличия формы поперечного сечения до и после деформации за проход.

Мерой сложности в определенной степени служит величина отношения периметра профильной трубы к периметру равновеликого кольца, а также отношение расстояний между двумя наиболее удаленными точками каждого контура при равных поперечных сечениях. От рассмотренных условий процесса зависит характер течения металла. Следует отметить, что последний определяется общим законом пластической деформации – законом наименьшего сопротивления.

Как показал анализ геометрии (рис. 3.10) и особенностей течения металла при волочении на оправке труб с переменной толщиной стенки в сравнении с профилированием трубы путем изгиба стенки имеются следующие основные особенности:

1. Сложная форма контактной поверхности, что приводит к сложной схеме течения металла, а именно к объемному перемещению частиц металла в продольном, радиальном и поперечном относительно оси волочения направлениях и происходящему при этом возникновению областей утонения либо утолщения стенки трубы.

2. Возникающее затрудненное течение металла по ребрам многоугольного профиля, либо по впадинам и выступам криволинейного профиля приводит к повышенному давлению металла на рабочий инструмент и повышенным контактными касательным напряжениям, что снижает стойкость инструмента и вызывает повышенные требования к качеству подготовки металла перед волочением и применяемой технологической смазке.

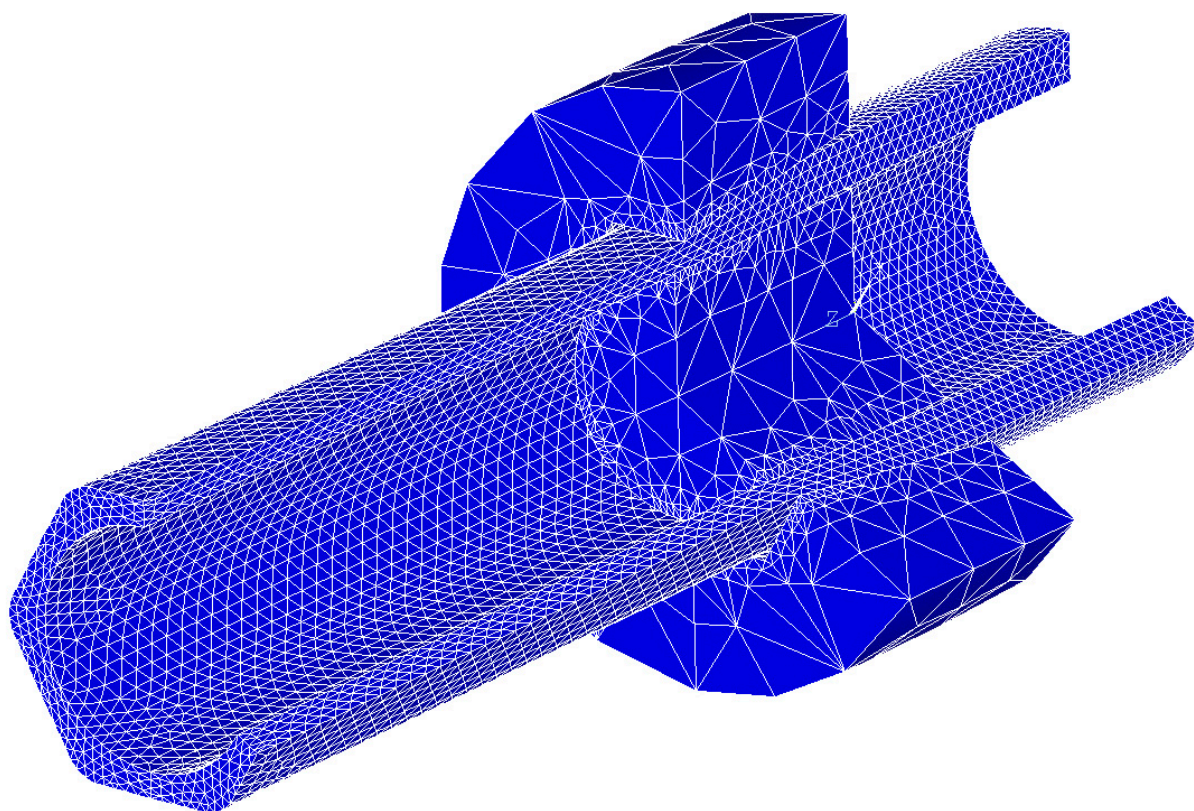


Рис. 3.10. Конечно-элементная модель очага деформации.

3. Рассмотренные выше кинематические и силовые особенности очага деформации вызывают увеличение тягового усилия, потребного для выполнения процесса, что приводит к снижению запаса прочности переднего конца труб и в результате этого приводит к снижению допустимых вытяжек. Кроме того, возникают повышенные требования к качеству забивки под волочение переднего конца трубы. В свою очередь, это может приводить к необходимости проведения многопереходного волочения.

Таким образом, необходим анализ деформационных и силовых условий процесса, определение областей с неблагоприятным распределением интенсивности напряжений и деформации, расчет поврежденности металла. Это особенно важно при использовании труб из труднодеформируемых материалов. Для установления картины особенностей указанных выше параметров рассмотрим последовательно:

- влияние размеров заготовки на геометрию готовых труб;
- формоизменение границ контактной зоны очага и кривизны ребер;
- перемещение металла по граням и ребрам трубы для случаев описания многоугольником поперечного сечения.

Влияние размеров заготовки.

На первом этапе исследовали влияние заготовки на геометрию готовых труб и устойчивость процесса профилирования, выполнили варьирование площадью поперечного сечения трубной заготовки. В результате моделирования установлено, что изменение площади поперечного сечения в пределах допусков ГОСТа на заготовки труб повышенной точности не приводит к значительному изменению геометрии готовых труб. Более значительное увеличение площади заготовки приводит к улучшению заполнения углов профиля, но вызывает потерю прочности конца трубы, вышедшего из волоки. В свою очередь, уменьшение площади поперечного сечения заготовки может приводить к незаполнению профиля. Действительно, если площадь поперечного сечения трубной заготовки значительно меньше площади выходного канала, образованного инструментом (волокой и оправкой), то имеет место явление, которое можно назвать «нехваткой объема металла». При этом происходит профилирование трубы по наружной поверхности (образование шестигранного профиля со значительной величиной радиусов ребер), а также утонение стенки в зонах на гранях профиля в зазорах между волокой и оправкой. Однако зоны внутреннего профиля вблизи ребер не имеют контакта с оправкой, вследствие чего возникает радиус, являющийся эквидистантой наружного радиуса на ребре

профиля (толщина стенки остается неизменной и близкой к таковой для трубной заготовки). Полученный внутренний профиль имеет вид окружности с дугообразными лучами на ребрах профиля (рис. 3.11).

Сравнение теории и эксперимента по этим параметрам приведено в главе 4. Таким образом, подтверждена правильность выбора размеров заготовки, приведенная в главе 2.

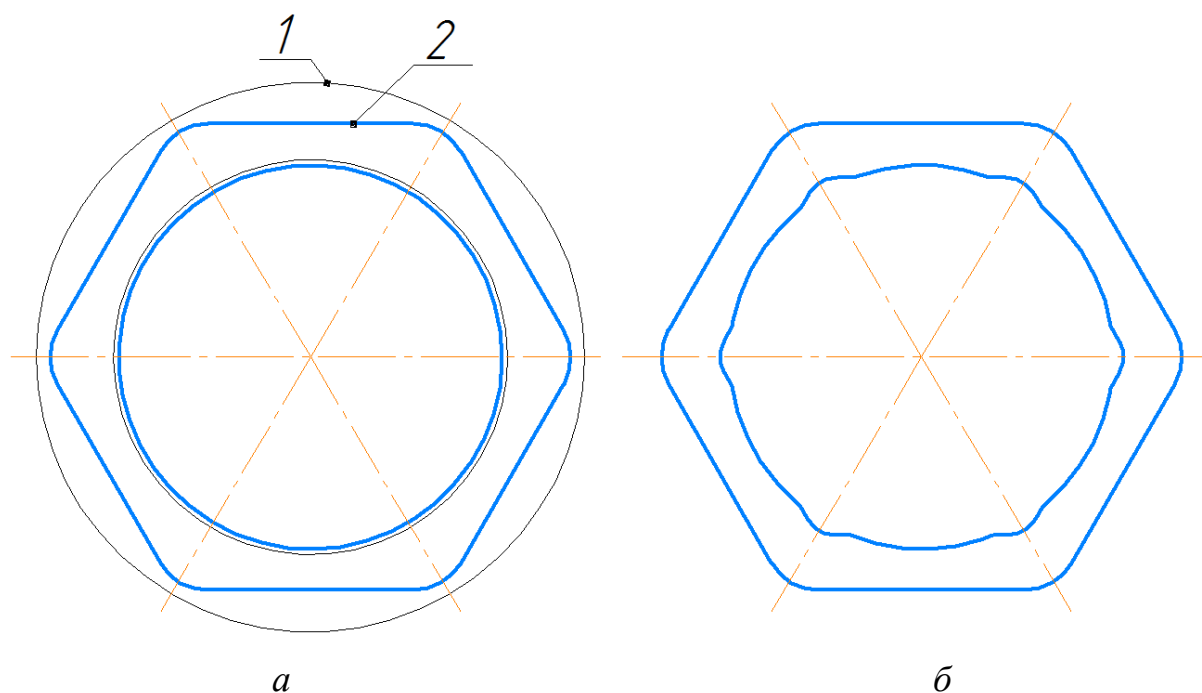


Рис. 3.11. Влияние размеров заготовки на геометрию готовой трубы: а – поперечное сечение при правильном выборе заготовки (1 – заготовка, 2 – готовая труба), б – поперечное сечение при уменьшенной толщине стенки.

Для установления влияния на параметры процесса показателя трения ψ его варьировали в пределах от реального значения, определенного практикой 0,09 до минимальной величины 0,005.

Границы контактной зоны и радиусы ребер.

При продвижении точек заготовки по волоке от входа к выходу возникает зона контакта трубы и волоки, которая по мере продвижения становится шире, причем боковые границы расширяются примерно по прямой линии (рис. 3.12). Такое расширение на боковой поверхности ограничено участками, на которых формируются радиусы ребер. Расчеты по модели МКЭ

показали, что механические свойства материала трубы мало влияют на формирование и размеры контактной зоны, которые определяются, в основном, геометрией контактирующих поверхностей. Однако способность металла к смазыванию через посредство показателя трения оказывает определенное влияние.

Изменение радиуса закругления ребер, показанное на рис. 3.12, позволяет заключить, что от входа к выходу радиус закругления изменяется от $D_3/2$ до некоторого конечного значения, определяемого как условиями деформации, так и параметрами геометрии заготовки. С ростом показателя трения течение металла в углы волоки замедляется, снижается также расширение боковых границ очага деформации.

Разность радиального размера волоки в углах профиля и точке максимального радиуса трубы (рис. 3.13) по ребру увеличивается с ростом показателя трения и несколько различается для стали 10 и титана BT1-0 (рис. 3.14).

Перемещение металла по граням

Рассматривали перемещение материала на наружной поверхности трубы по граням от входа в очаг деформации. Установлено, что мгновенные значения этого показателя распределены неравномерно. Максимумы расположены в середине граней и несколько смещены в сторону выхода, при этом у задней границы очага перемещение снижается.

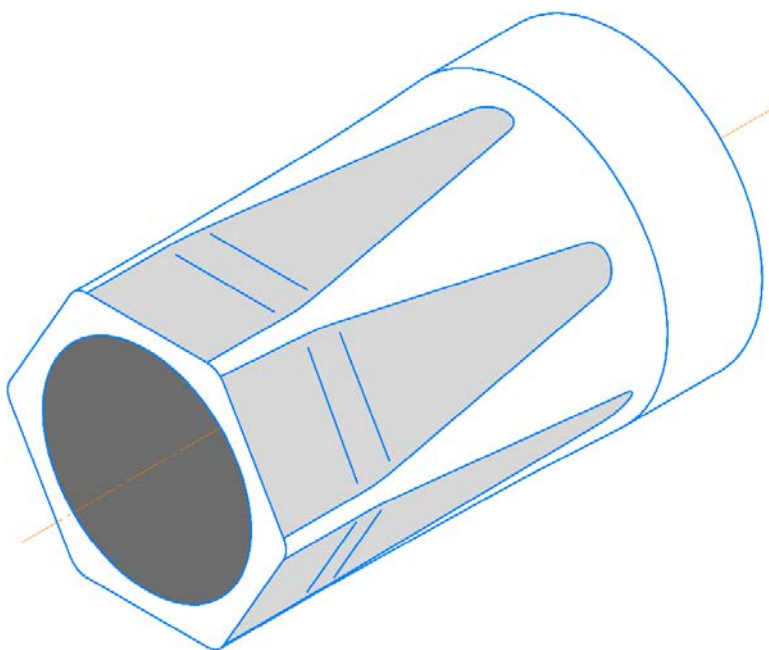


Рис. 3.12. Формирование границ контактной зоны на гранях профиля трубы.

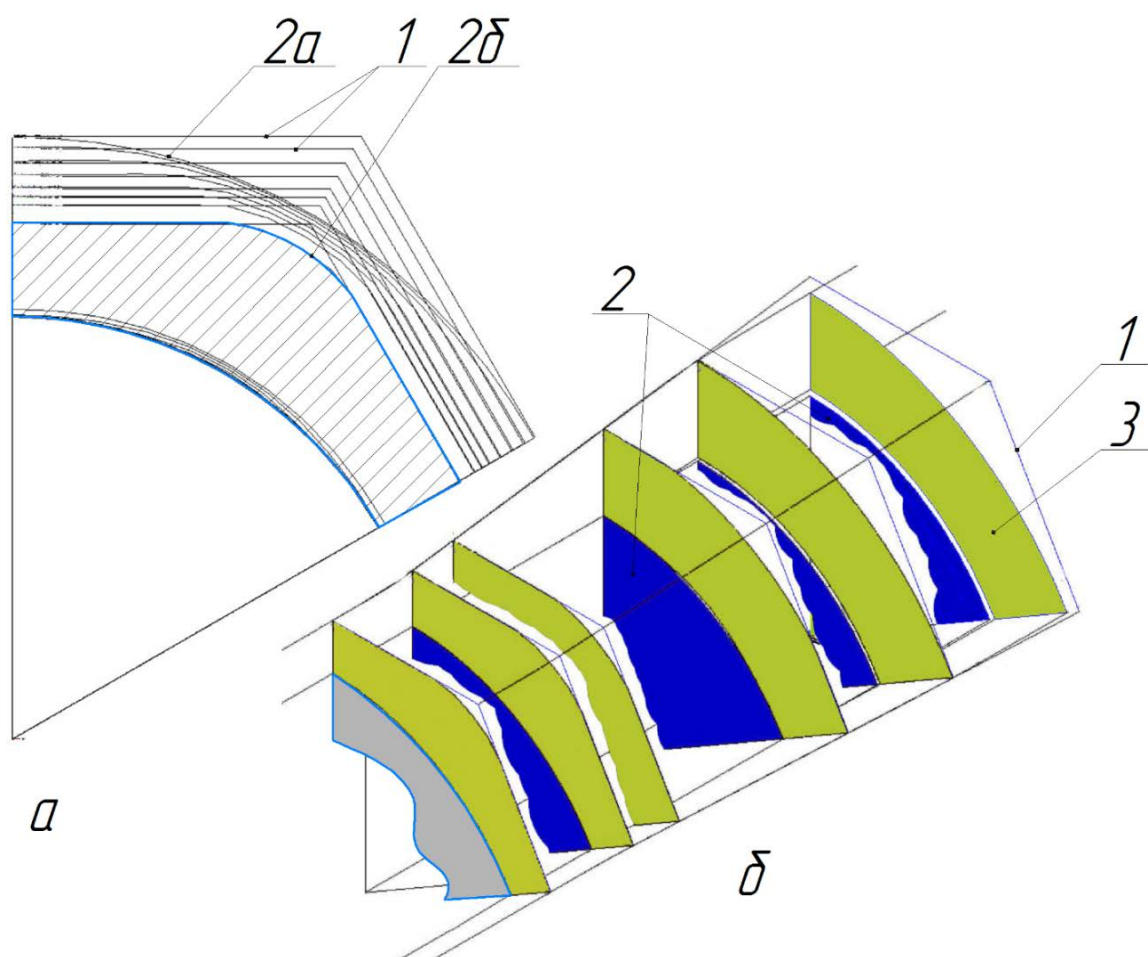


Рис. 3.13. Изменение радиуса ребер профиля вдоль очага деформации. а – плоские сечения (1 – контур волокна, 2а – контур заготовки, 2б – контур готовой трубы), б – трехмерная форма (1 – контур волокна, 2 – положение оправки, 3 – формоизменение трубы).

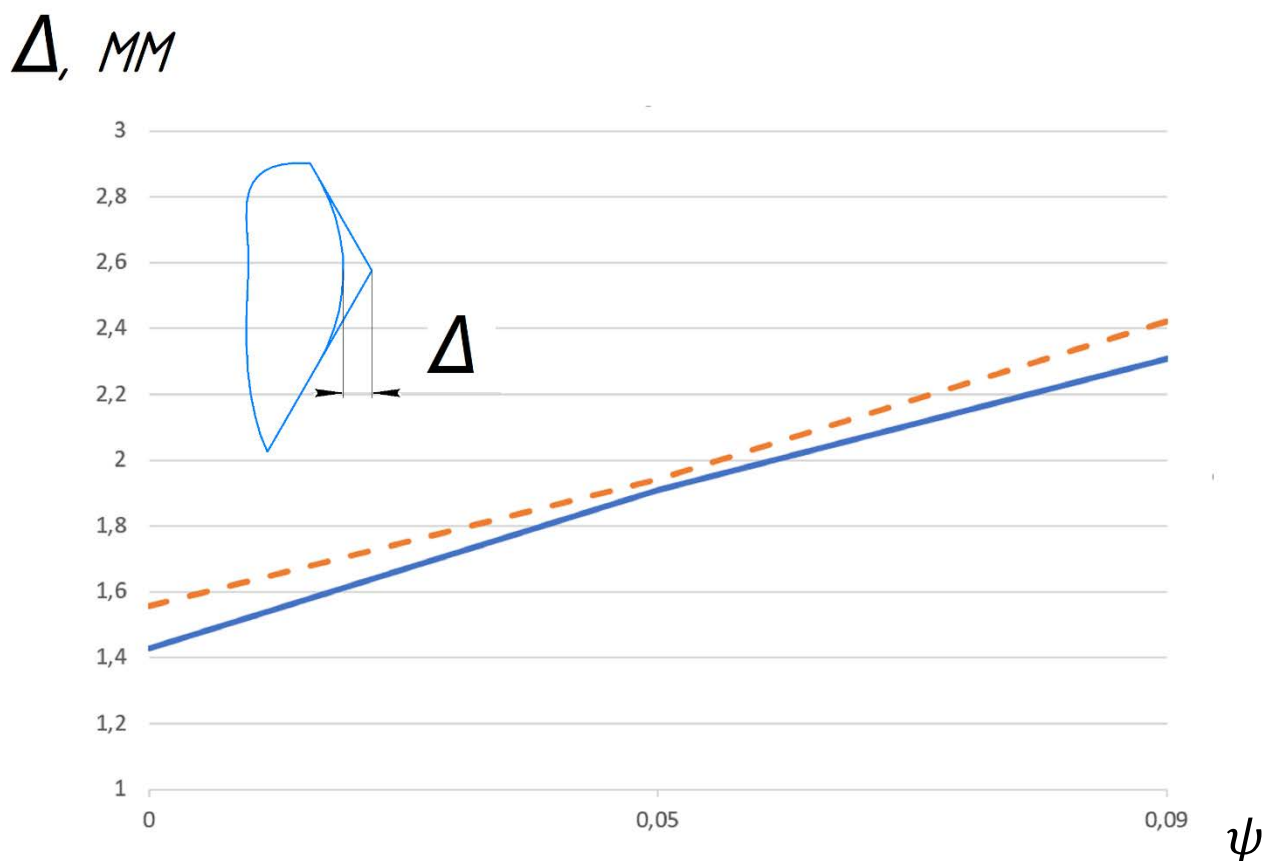


Рис. 3.14. Зависимость незаполнения углов профиля Δ от показателя трения ψ : сплошная линия - сталь 10, пунктир - титан VT1-0.

Деформированное состояние металла.

Рассмотренные выше особенности формоизменения и течения металла определяют деформированное состояние, которое оценивали интенсивностью деформации ε_i (рис. 3.15). Эти значения различны на наружной и внутренней поверхностях трубы. В целом значения интенсивности деформации на внутренней поверхности больше, чем на наружной. Что касается этих различий, то на наружной поверхности максимумы расположены в середине граней, а минимумы по ребрам профиля. На внутренней поверхности картина иная. Так, максимумы расположены в середине грани. Там же имеется абсолютный максимум интенсивности деформации. В свою очередь, минимум значения имеет место в сечениях, соответствующих наружным граням.

В зависимости от марки материала установлено, что для сплава ВТ1-0 все значения ε_i меньше, чем для стали 10, имеющей механические свойства ниже. При этом показатель контактного трения мало влияет на деформированное состояние. Отметим, что поскольку для рассмотренного случая профилирования готовая труба с наружным шестигранником довольно близка к очертаниям круглой трубы, то коэффициент неравномерности интенсивности деформаций не превышает значения $K_H = \varepsilon_i^{max} / \varepsilon_i^{min} \leq 1,41$.

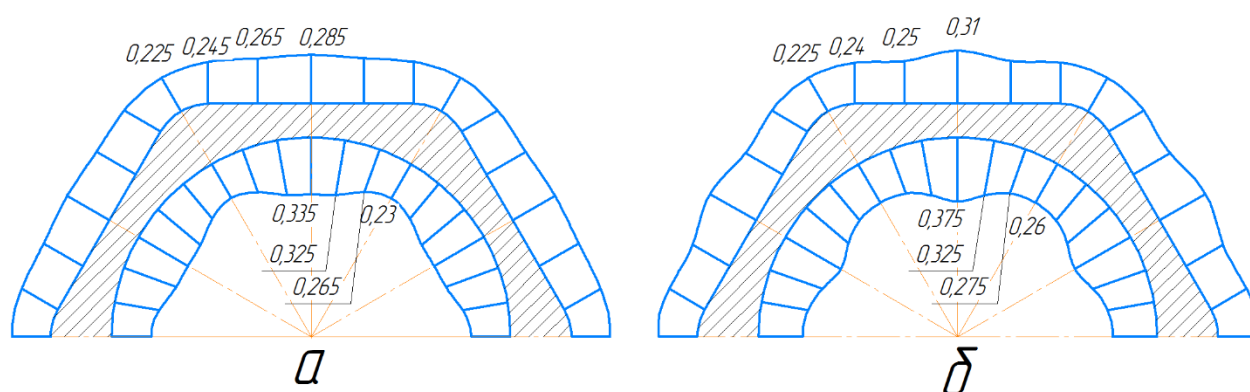


Рис. 3.15. Распределение интенсивности деформации в выходном сечении трубы. Материалы: а – сплав ВТ1-0, б – сталь 10; показатель трения $\psi=0,09$.

3.2. Силовые условия деформации и поврежденность металла.

3.2.1. Контактное давление металла на рабочий инструмент.

Контактное давление, возникающее на поверхностях рабочего инструмента, определяет многие характеристики самого инструмента, а также важные показатели процесса волочения. Контактное давление в очаге деформации необходимо находить как для волокна, так и для оправки. Следует отметить, что контактное давление при волочении на оправке ТПТС до настоящего времени не изучено.

Этот показатель необходимо определять по следующим причинам:

- на основе расчета контактного давления возможен выбор материалов волокон и оправок;

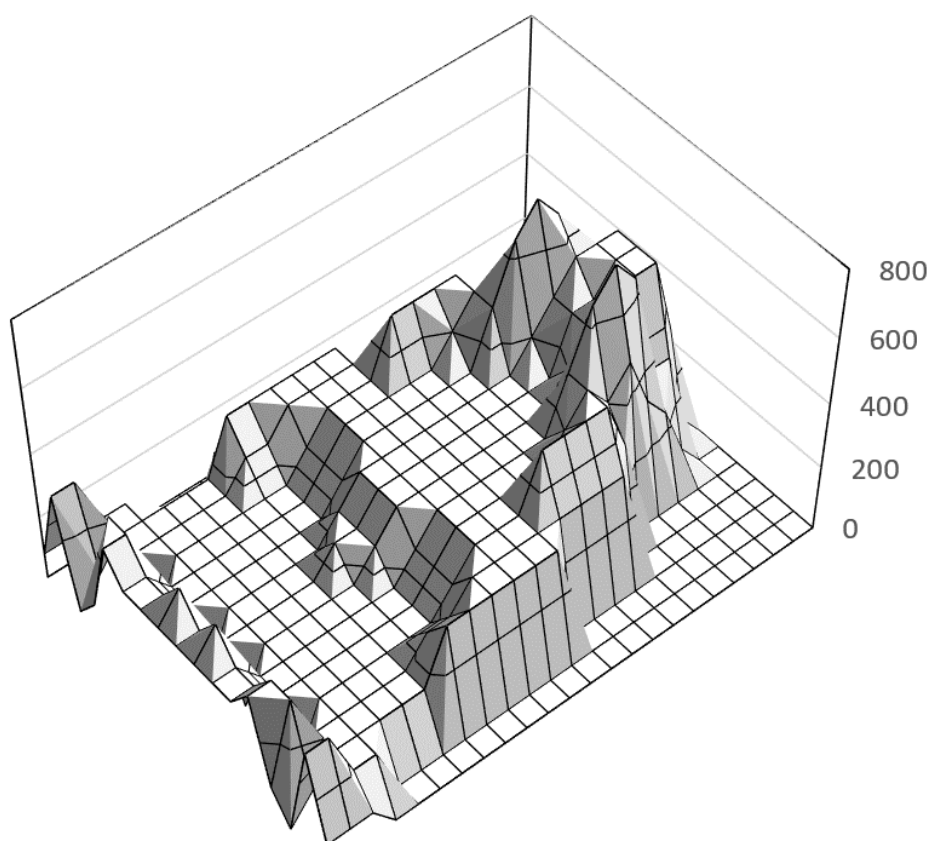
- возможно определение стойкости волок и оправок и подбор технологической смазки;
- необходимо находить осевое усилие, действующее на оправку.

Что касается первой и второй из указанных причин, то поскольку диапазон размеров ТПТС составляет по наружной поверхности от 5 до 150 мм, то применением твердосплавного инструмента невозможно охватить весь указанный сортамент труб и возникает необходимость использования стального инструмента. При этом необходимо подбирать марку стали, определить выбор типа смазки и технологии нанесения подсмазочного и смазочного слоев.

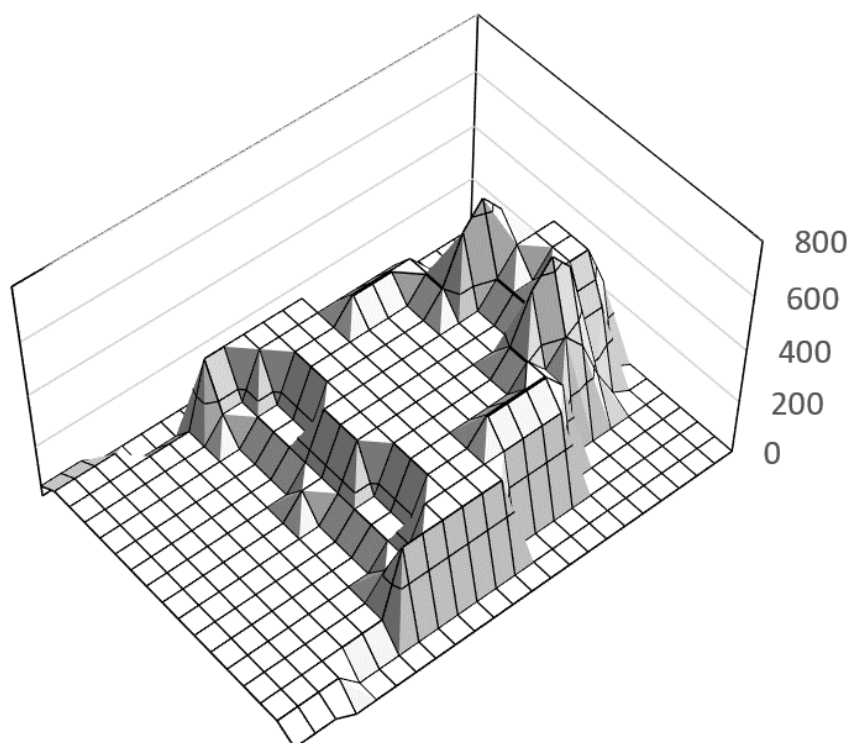
Определение осевого усилия, действующего на оправку и оценка в этой связи прочности стержня оправки основано на процедуре подсчета и суммирования сил нормального давления и нахождения касательных сил трения по всей поверхности оправки.

Использование разработанных выше моделей и метода конечных элементов позволяет найти контактное давление в очаге деформации. Максимум контактного давления возникает в области начала контактной поверхности (рис. 3.16). 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 (рис. 3.17, б) контактная эпюра давления имеет более плавный характер. Возникновение пика давления начинается несколько позднее, чем на волоке, а относительное значение давления сохраняется.

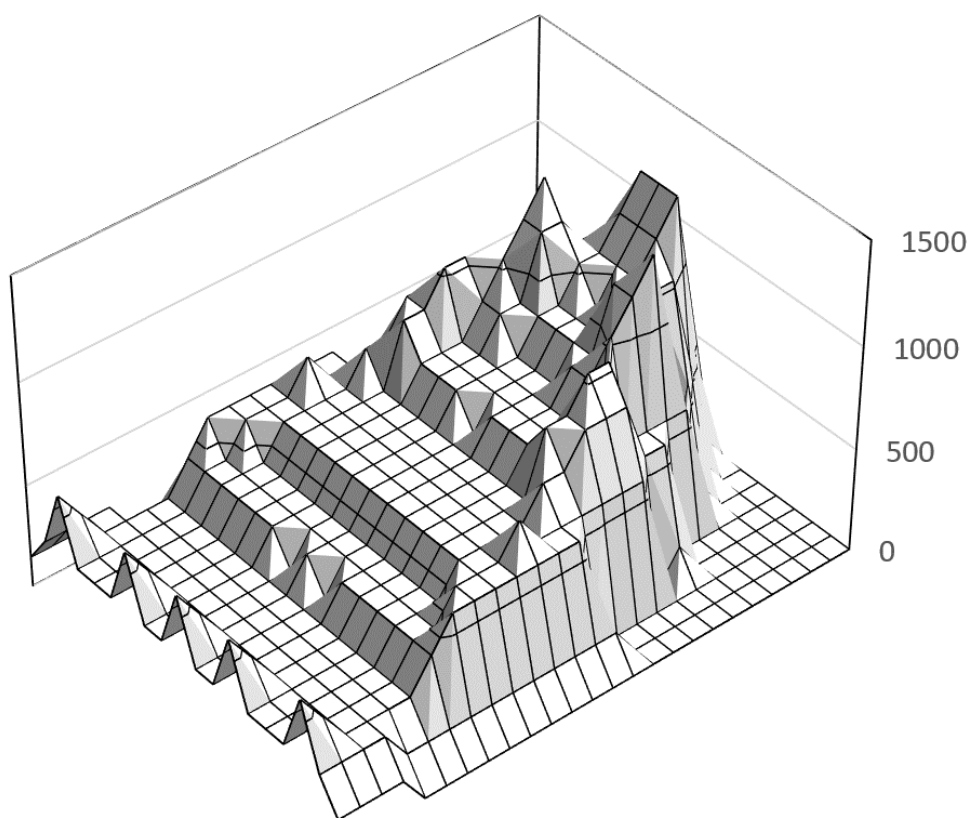


a

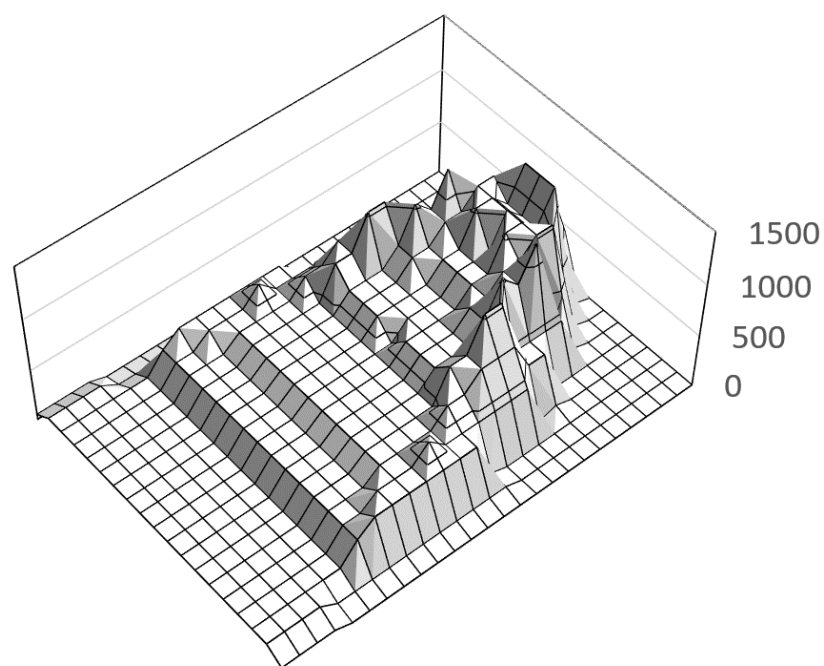


б

Рис. 3.16. Распределение контактного давления по поверхности очага деформации: а – волокна, б – оправка. Материал трубы – сталь 10, $\psi=0,09$.



а



б

Рис.3.17. Распределение контактного давления по поверхности очага деформации: а – волокна, б – оправка. Материал трубы – Титан BT1-0, $\psi=0,09$.

3.2.2. Напряженное состояние

Напряженное состояние металла в очаге деформации характеризовали показателем напряженного состояния σ/T , который является инвариантом и определяет пластичность металла и его поврежденность, что дает возможность при многопереходных процессах найти место промежуточной термообработки для восстановления пластичности.

Наружная поверхность. Вдоль наружной поверхности очага деформации этот показатель изменяется от отрицательного значения к положительному (рис. 3.18) при всех значениях показателя трения. При этом для сплава ВТ1-0 максимум расположен в середине грани с незначительным уменьшением на ребре (для показателя трения $\psi=0,005$). 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.

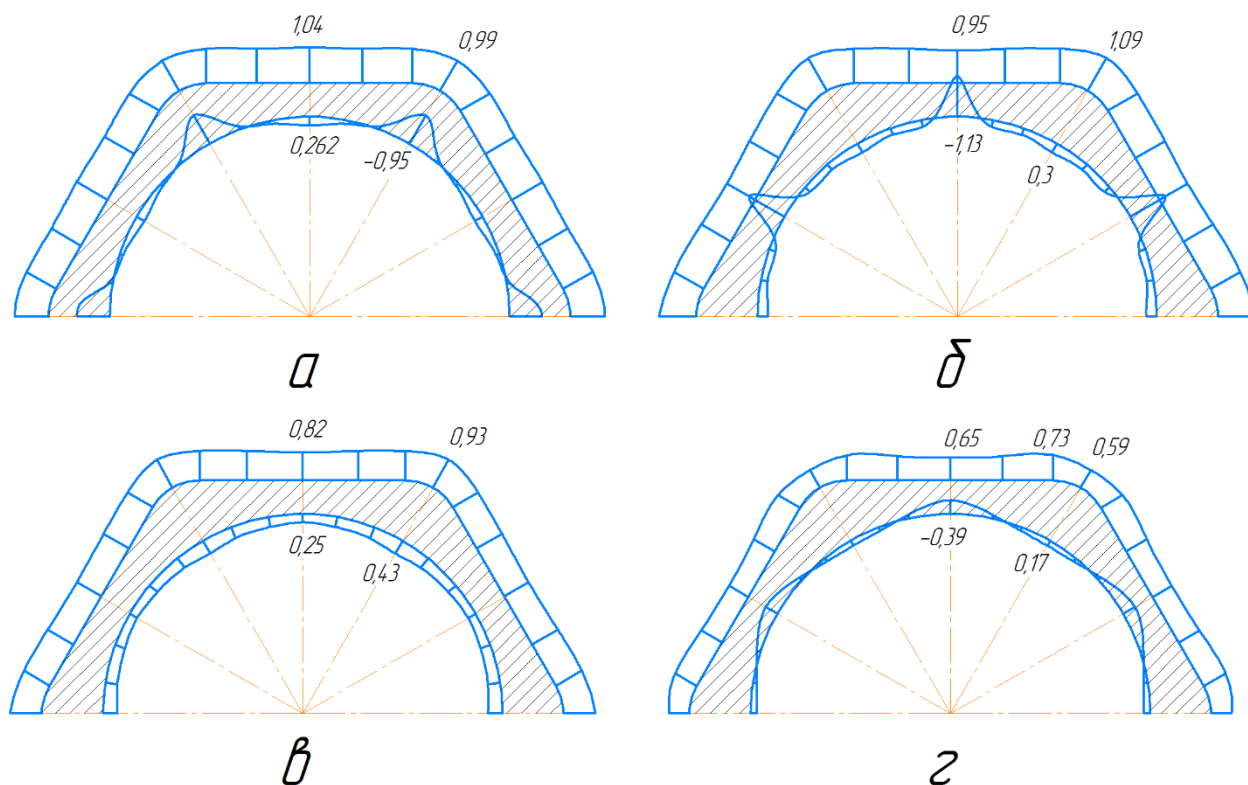


Рис. 3.18. Распределение показателя напряженного состояния σ/T в плоскости выхода по сечению трубы: для сплава ВТ1-0 при $\psi=0,005$ (а) и $\psi=0,09$ (в) и стали 10 при $\psi=0,005$ (б) и $\psi=0,09$ (г).

Для стали 10 картина напряженного состояния на рассматриваемой поверхности такова, что распределение этого показателя меняется на обратное. Так, при $\psi=0$ 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.

Внутренняя поверхность.

Здесь 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.

С ростом показателя трения распределение σ/T значительно изменяется, а его распределение по сечению становится более плавным как для сплава ВТ1-0, так и для стали 10. В частности, при волочении сплава ВТ1-0 по всей внутренней поверхности показатель σ/T положителен с небольшим ростом от середины грани к области ребер профиля. Для стали 10 в этом случае в середине грани имеет место отрицательное значение показателя напряженного состояния, а в области ребра – небольшое положительное значение.

3.2.3. Поврежденность металла при волочении

Поврежденность металла является величиной, которая определяется как интенсивностью деформации, так и напряженным состоянием. Эти величины, 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 (рис. 3.19). 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.

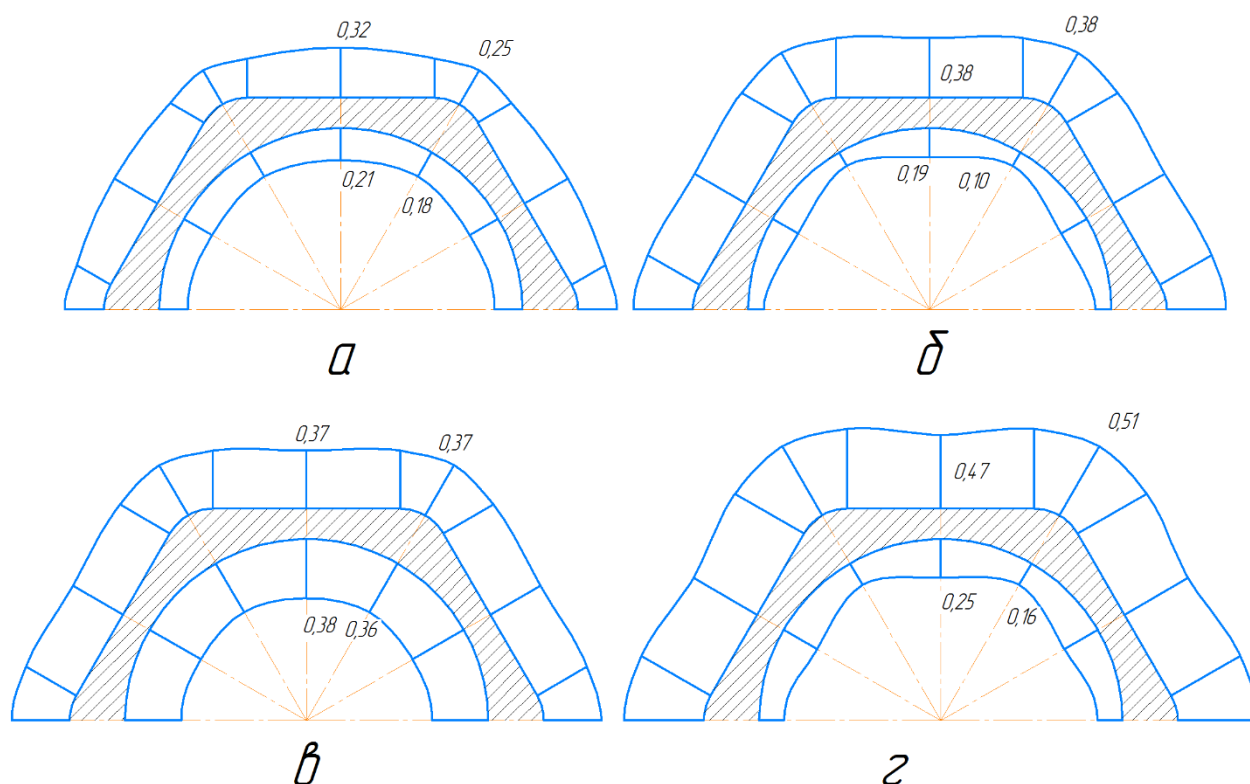


Рис. 3.19. Распределение поврежденности металла по сечению трубы: для сплава ВТ1-0 при $\psi=0,005$ (*a*) и $\psi=0,09$ (*в*) и стали 10 при $\psi=0,005$ (*б*) и $\psi=0,09$ (*г*).

Для внутренней поверхности изменения также невелики. Так, при $\psi=0,005$ для титана ВТ1-0 поврежденность больше в середине грани, чем в области ребра профиля. Аналогичное распределение при $\psi=0,005$ для стали 10. При $\psi=0,09$ поврежденность титана ВТ1-0 также больше в середине грани и несколько меньше на ребре профиля. Аналогичное распределение поврежденности при $\psi=0,09$ наблюдается и для стали 10.

В целом для всех рассматриваемых случаев поврежденность не достигает критических значений.

3.3. Выводы по главе 3

1. Использование на основе компьютерного моделирования конечно – элементного представления разработанных твердотельных моделей и системы уравнений теории пластичности позволяет выполнить анализ зависимостей основных параметров очага деформации при волочении на оправке труб с переменной толщиной стенки от определяющих факторов, в частности, соотношения размеров заготовки и готовых труб, механических свойств материала, контактного трения др.
2. Установлено, что выбор наружного диаметра и толщины стенки заготовки находятся в достаточно узких пределах. Так, увеличение сечения заготовки несколько улучшает геометрию готовых труб, но ограничено прочностью переднего конца трубы, с другой стороны уменьшение площади поперечного сечения заготовки приводит к неполному заполнению профиля.
3. Величина радиального перемещения максимальна в середине грани многогранного профиля. Вместе с тем, соотношение радиального и продольного перемещений таково, что даже при превышении наружного диаметра заготовки над наиболее удаленной от оси трубы точкой профиля на ребрах профиля имеется зона внеконтактной деформации, которая уменьшается по ширине и высоте по мере продвижения трубы от входа в очаг деформации к выходу.
4. Снижение показателя контактного трения позволяет улучшить заполнение углов профиля лишь до определенного предела и мало зависит от марки материала.
5. Интенсивность деформации имеет максимальные значения на внутренней поверхности трубы в середине грани и минимальные значения по ребрам профиля, а на наружной поверхности трубы максимумы расположены в середине граней и по ребрам профиля, причем для материала, имеющего повышенные механические свойства все значения интенсивности несколько ниже.

6. Контактное давление распределено неравномерно по поверхности профиля, причем максимальные его значения наблюдаются на входе трубы в очаг деформации, при этом величина максимума зависит от марки материала и величины контактного трения.
7. Значение показателя напряженного состояния распределено по сечению трубы неравномерно таким образом, что при малых значениях показателя трения на наружной поверхности оно изменяется мало, а на внутренней поверхности возникаю местные пики, с ростом показателя трения изменение показателя напряженного состояния становится более плавным, причем абсолютные его значения зависят от марки материала.
8. Поврежденность металла при волочении ТПТС как при наружной, так и по внутренней поверхностям распределено весьма равномерно, она мало зависит от радиального напряжения и для рассматриваемых условий не достигает критических значений.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТПТС

В главе определены цели и задачи экспериментального исследования, описаны аппаратура, образцы и методики для его проведения, приводятся результаты и их сравнение с теорией. Даны рекомендации по совершенствованию технологического процесса и использованию оборудования, применение которого позволит повысить эффективность процесса получения ТПТС.

4.1. Цели и задачи эксперимента

Процесс изготовления труб с переменной толщиной стенки определяется как параметрами рабочего инструмента (волока и оправок), механическими свойствами и размерами заготовки, и подготовкой ее поверхности к волочению, так и другими значимыми факторами. Очаг деформации имеет форму, отличающуюся значительной сложностью по геометрическим и кинематическим соотношениям и выше представлен объемными моделями. Наконец, рассматриваемый процесс не ограничен принятыми при расчетах допущениями.

Теоретическое исследование выполнено на основе конечно – элементной интерпретации уравнений теории пластичности, причем последние заменены конечными аналогами, а геометрическое описание рабочего инструмента представляется набором объемных элементов, моделирующих их с определенной точностью.

В этой связи необходима экспериментальная оценка точности полученных теоретических значений с использованием натуральных образцов труб, которые обрабатываются в условиях, приближенных к реальным. Поставленные 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);

Для достижения поставленных целей необходимо:

- определить фактические значения параметров кривых упрочнения исследуемых образцов труб, поскольку в литературе эти параметры задаются как величина математического ожидания их значений;
- 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.

4.2. Аппаратура, образцы и методики эксперимента

Эксперименты выполнены на четырех площадках: УрФУ им. Б.Н. Ельцина (измерение размеров волок и профильных труб), НПО «Алмаз-Антей» (определение механических свойств материала труб), ИМАШ УрО РАН (получение микрошлифов труб), УрИ ГПС МЧС России (изучение процесса профилирования труб).

4.2.1. Аппаратура

Проведение экспериментального исследования процесса волочения ТПТС на оправке выполнено с использованием разрывной машины универсального назначения *ИР5113-100* (рис. 4.1), табл. 4.1. Комплектность ее основной поставки: испытательная установка, приборная стойка, пульт оператора, микропроцессор ПО-3), захваты для образцов тип IV, ГОСТ 1497, измеритель силы тензорезисторный, принтер, программно-технический комплекс.



Рис. 4.1. Разрывная машина универсального назначения с электронным силоизмерителем для испытания образцов материалов и изделий IP5113-100 (труб и др.) на растяжение, сжатие и изгиб.

Таблица 4.1.

Техническая характеристика разрывной машины

Наибольшая предельная нагрузка, кН	100
Пределы допускаемой погрешности измерения нагрузки, % (в диапазоне нагрузок, кН)	± 1 (от 4 до 100)
Скорость перемещения активного захвата, мм/мин	от 0,1 до 500
Номинальная цена единицы наименьшего разряда: при индикации нагрузки, Н	10
при измерении перемещения активного захвата, мм	0,01
Ход подвижной траверсы без захватов, мм	700
Ширина рабочего пространства, мм	400
Максимальная мощность, кВт (питание)	1,5 (3N, 380В, 50 Гц)

При проведении экспериментов машина дополнительно оснащена опорой волоки и оснасткой для трубы.

Измерение размеров сечения обработанных образцов, размеров и формы рабочего инструмента проводили на координатно-измерительных машинах с оптико-механическим преобразованием УИМ-23 и ДИПЗ, с точностью измерения до 5 мкм, а также с помощью координатно-измерительной машиной Global Performance с ПО Power SHAPE 7080 , предназначенной для контроля линейно-угловых размеров, формы измеряемых объектов, взаимного положения геометрических объектов. Внешний вид машины представлен на рис. 4.2. Точность измерения при использовании насадки SP 25 E, (L в мм) мкм: $1,5+L/333$ (мкм).



Рис. 4.2. Координатно-измерительная машина Global Performance.

4.2.2. Условия проведения опытов и методики экспериментов.

Условия проведения опытов.

Выполняли оправочное волочение образцов труб в профильные волокна с использованием разрывной машины универсального назначения. При волочении использовали шестигранную волоку, рабочий конус которой имел форму усеченной регулярной пирамиды с углом наклона грани 8° и выходным размером «под ключ» 10,3 мм. Волока была выполнена из металлокерамического порошкового материала марки ВК-8, подвергнута спеканию и шлифовке высотой микронеровностей не более 0,16 мкм. Твердосплавная часть запрессована в стальной корпус.

Использовали также массивную волоку, имевшую квадратный профиль выходного сечения размером 9,5 x 9,5 мм. Ее изготовили из инструментальной стали с закалкой до твердости 64 HRC. Контактную поверхность шлифовали и полировали до высоты микронеровностей не более 0,16 мкм. На измерительной машине определяли размеры и профиль волок, полученные модели использовали далее для конечно – элементных расчетов.















Оправки выполнили из стали У8, их закаливали, шлифовали и полировали.

Использовали трубную заготовку, полученную холодной деформацией, которую перед волочением отжигали и проводили операцию по удалению окисленного поверхностного слоя. Испытания по ГОСТ 10006-73 [77] механических свойств труб проводили растяжением образцов, вырезанных из заготовки, подвергнутой затем волочению. Размеры заготовки перед волочением контролировали. Исследовали деформацию труб из трех материалов: стали 10, 20 и латуни Л-63. Смазкой при волочении служил состав *LIQUI MOLY LM 47 Langzeitfett* + MoS_2 (смазка консистентная для высоконагруженных узлов, с присадкой – дисульфидом молибдена). Маршруты волочения шестигранных труб приведены в табл. 4.2. Обработка труб производилась на скоростях перемещения от 5 до 50 мм/мин с ручной подачей смазки в зоны трения.

После волочения измеряли размеры труб в направлении «под ключ» S и по наибольшему размеру по ребрам D . Производили вырезку темплета очага деформации, который далее разрезали по диаметральной плоскости на электроискровом станке, что исключало наклеп полученной поверхности.

Параметры труб для эксперимента

Таблица 4.2.

№ п/п	Материал	D_3 , мм	t_3 , мм	$D_3 - 2t_3$, мм	Δ , мм	$d_{оп}$, мм	μ	Заготовка и готовый профиль	
1	Латунь Л63	11,9	3,1	5,67	0,33	5,0	1,19		
2		11,9	1,6	8,7	0,35	8,0	1,24		
3	Сталь 10	14,1	2	10,1	0,5	9,1	2,83*		
4		14,1	3,2	7,7	0,35	7,0	2,05*		
5		12,0	1,1	9,8	0,4	9,0	1,33		
6	Сталь 20	12,05	2,6	6,85	0,42	6,0	1,21		
7		14,2	4,2	5,8	0,4	5,0	1,83*		

* двухпроходное волочение

Методика определения деформированного состояния микроструктурным методом

В соответствии с положениями теории сопротивления материалов пластическому деформированию всякая материальная частица твердого тела, имевшая сферическую форму, после деформации преобразуется в самом общем случае в эллипсоид [107]. По направлению и величине главных полуосей эллипсоида можно установить направление главных осей деформации и величину трех главных компонентов деформированного состояния. Определение этих величин проведено на основе микрошлифов вблизи внутренней поверхности темплета заготовки и темплета готовой шестигранной трубы из стали 10 в точке также вблизи внутренней поверхности на середине грани профиля. Травление микрошлифов с целью выявления границ зерен производилось соответствующим составом.

За основу измерений при микроструктурном анализе взято измерение длин прямолинейных отрезков ρ , пересекающих в заданных направлениях определенное, заранее установленное число зерен, которое, согласно параметру ориентации А.А. Ильюшина составляет 8..10 зерен. При выполнении работы производили электронное считывание изображения микрошлифов при помощи CMOS-регистратора, которое передавалось на связанный с ним компьютер. На полученное компьютерное изображение накладывали в графическом пакете в виде прозрачного слоя сетку-транспарант, представляющую собой отрезки одинаковой длины, проведенные из одного центра через постоянное число градусов (15°) и охватывающие диапазон $\theta = 0..180^\circ$. На полученном изображении микроструктуры с сеткой производилось сопоставление замеренных длин отрезков ρ с ρ_0 , определенным в соответствующей точке недеформированной трубы, которое служило для расчета основных параметров деформированного состояния в области данного микрошлифа.

Далее производили расчеты величин:

$$Q_K = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_0^2}{\rho^2}; c_1 = \sum_{i=1}^n \cos 2\Theta; Q_A = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_0^2}{\rho^2} \cos 2\Theta_i; c_2 = \sum_{i=1}^n \cos 4\Theta_i$$

$$K = \frac{Q_K(n + c_2) - 2Q_A c_1}{n(n + c_2) - 2c_1^2}; A = \frac{Q_K - nK}{c_1}. \quad (4.1)$$

По полученным данным строили сглаженную кривую

$$\frac{\rho_0^2}{\rho^2} = K + A \cos 2\Theta_i, \quad (4.2)$$

на которую наносили экспериментальные точки. По формулам:

$$\varepsilon_a = -\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\rho_0^2}{\rho^2} \right)_{min}; \varepsilon_b = -\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\rho_0^2}{\rho^2} \right)_{max}; \varepsilon_N = -(\varepsilon_a + \varepsilon_b)$$

находили компоненты деформации. Наибольшую из этих величин принимаем за ε_1 , наименьшую - ε_3 .

Далее вычисляем интенсивность деформации ε_i и параметр Лоде:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{0,5(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + 0,5(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + 0,5(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (4.3)$$

$$\nu_\varepsilon = \frac{(2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}. \quad (4.4)$$

Определение деформированного состояния при волочении профильных труб с постоянной толщиной стенки показало хорошую сходимость теории и эксперимента [108, 109].

Методика статистической обработки результатов эксперимента.

Статистическую обработку результатов вели по двум методикам. Согласно одной из них, при исследовании интенсивности деформаций микроструктурным методом в рассмотрении по фотографии принимали $13 \times 10 = 130$ зерен на каждой из двух фотографий.

Согласно второй из них использовали метод малой выборки. Получение значимых величин на основе проведенных в экспериментах измерений возможно лишь на основе статистической обработки его результатов. Вследствие трудоемкости экспериментов по профилированию труб

количество реализаций одного типа опытов составляло $n_M=3..5$. В этих условиях наиболее адекватным представляется статистический анализ точечных диаграмм размахов данных опытов и их средних значений [110, 111].

В соответствии с этим:

1. Вычисляем размах и его доверительные границы:

$$R_i = \max X_j - \min X_j; \quad B_R = D_n \frac{R}{d_n}; \quad H_R = 0.$$

2. Вычисляем выбранную среднюю и ее доверительные границы

$$\bar{X}_j = (\sum X_j) / n_M.$$

где X_j - выборочные значения величин в выборке объемом n_M .

$$B_{\bar{X}} = \bar{X} + z \frac{\bar{R}}{d \sqrt{n_M}}, \quad H_{\bar{X}} = \bar{X} - z \frac{\bar{R}}{d \sqrt{n_M}},$$

где d_n - коэффициент, зависящий от объема выборки; D_n - значение аргумента функции распределения нормированного размаха при доверительной вероятности α ; z - аргумент функции Лапласа для доверительной вероятности $\alpha=0,9973$ ($z=3$).

Было принято, что $\alpha=0,995$, тогда [112] $d_n=1,693$ ($n_M=3$), и $d_n=2,326$ ($n_M=5$), $D_n=4,42$ ($n_M=3$), $D_n=4,89$ ($n_M=5$). По величине среднего размаха вычисляется оценка стандартного отклонения случайных погрешностей $\hat{\sigma}_u = \bar{R} / d_n$ и величина поля рассеяния случайных погрешностей в предположении их нормального распределения $\omega_u = 6\hat{\sigma}_u$.

4.3. Результаты экспериментального исследования и сравнение с теорией

Полученные в эксперименте данные были предназначены для сравнения с теоретическими расчетами. Такое сравнение 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 деформации и параметру Лоде.

Пример полученных экспериментально картин очага деформации и полученных образцов труб приведен на рис. 4.3. Обработанные на основе статистических оценок данные приведены в таблицах 4.3 и 4.4.

Дополнительно при эксперименте сравнивали процессы безоправочного и оправочного волочения. Такое сравнение этих процессов показало их существенные отличия. Так, при безоправочном волочении внутренняя поверхность принимает шестигранную форму, а при оправочном – соответствует профилю оправки (рис. 4.3, 1а), радиусы закругления ребер труб при безоправочном волочении больше, чем при оправочном (рис. 4.3, 2а). Численное сопоставление величин параметров упомянутых выше таблиц показывает удовлетворительное совпадение данных теории и эксперимента.

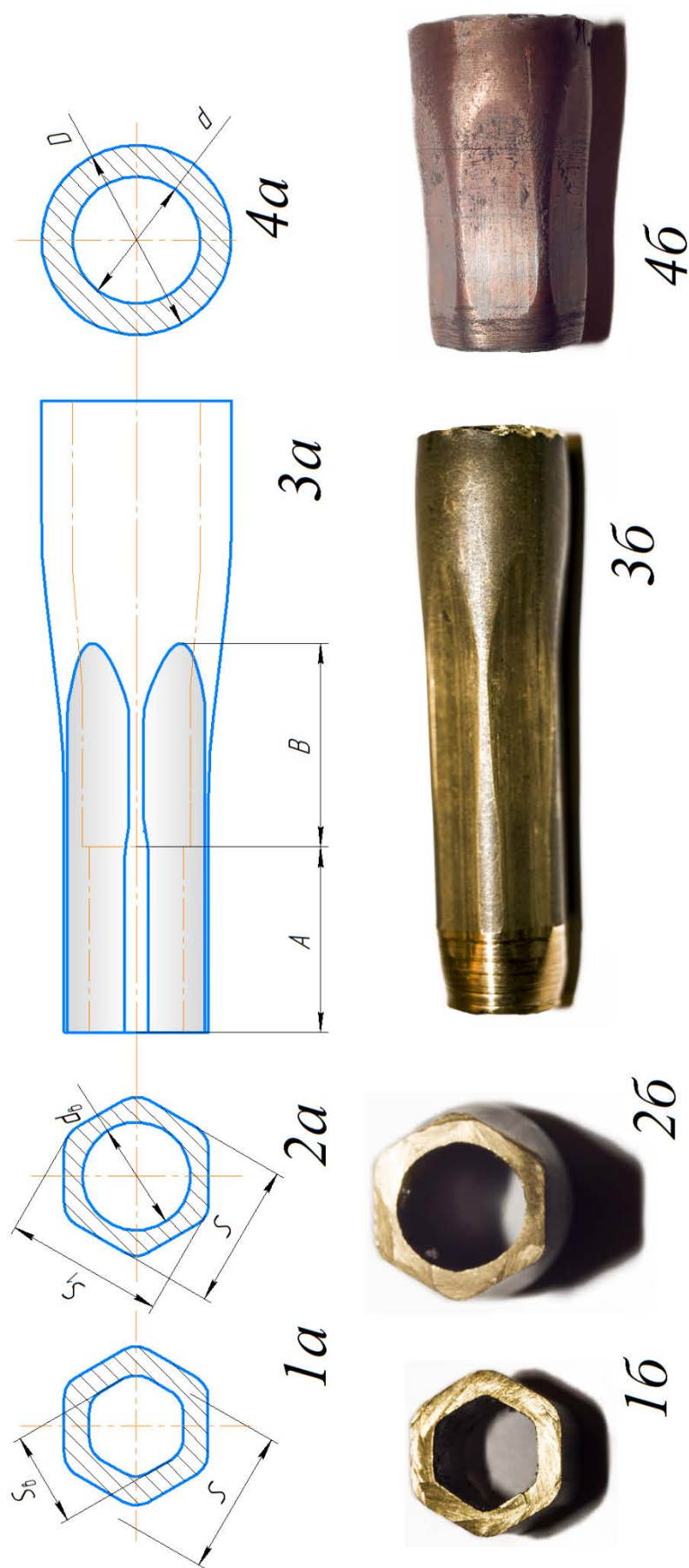


Рис. 4.3. Построение очага деформации по результатам эксперимента (а) и фотографии натуральных образцов (б): 1а и 1б – темплеты трубы при волочении без оправки; 2а и 2б – темплеты трубы при оправочном волочении; 3а и 3б – темплеты всего очага при безоправочном (А) и оправочном (В) волочении; 4а – контуры заготовки; 4б – очаг при оправочном волочении.

Таблица 4.3.

Сравнение геометрических параметров профиля по данным теории и эксперимента

Параметр	Численное значение	Параметр	Численное значение	Параметр	Численное 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

Таблица 4.4.

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 _{Δ} , мм	0,25	0,09
7	Статистическая оценка НДП _{Δ} , мм	0,18	0,05
8	Математическое ожидание незаполнения Δ_z , мм	0,142	
9	Теоретическое значение незаполнения, Δ_T , мм	0,15	
10	Отклонение теоретического значения математического ожидания Δ_T от экспериментального Δ_z , %	5,33	

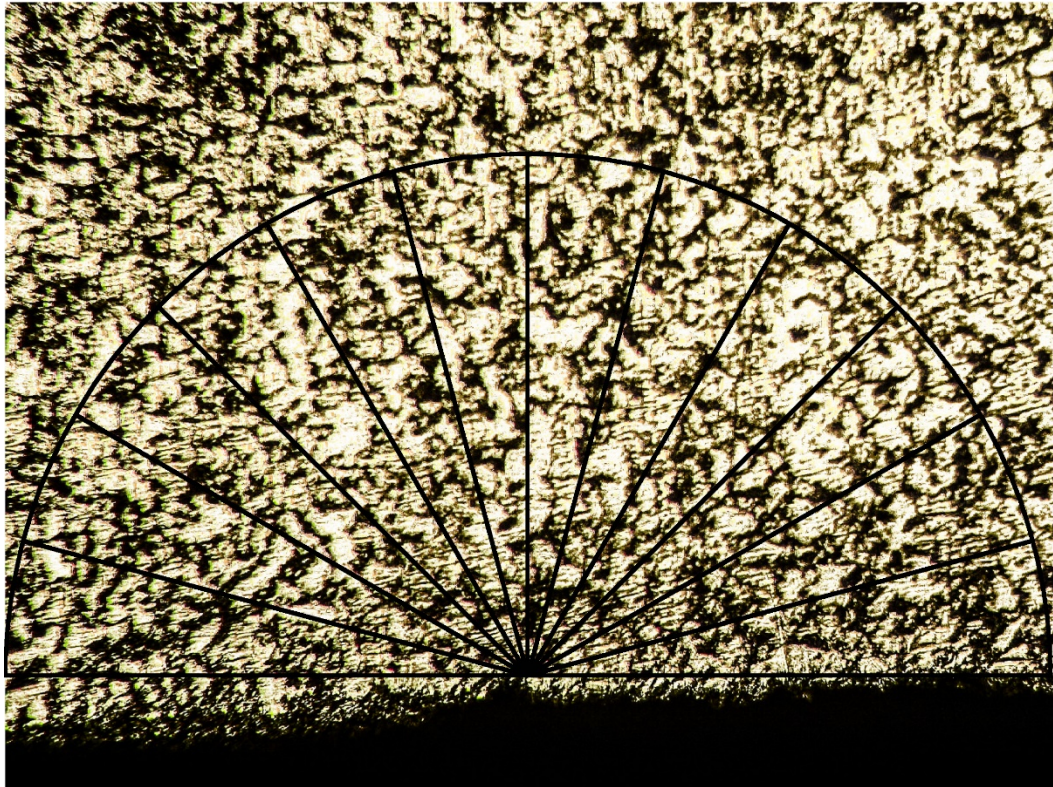
По описанной выше методике получены микрошлифы поперечного сечения стенок труб до и после волочения (рис. 4.4, а и б). На них наложена транспарантная сетка и измерены значения ρ_0 и ρ до и после деформации. Значения этих величин приведены в таблице 4.5. Далее вычислены значения $\frac{\rho_0^2}{\rho^2}$ и $\frac{\rho_0^2}{\rho^2} \cos 2\theta$ и по формулам (4.1) определены входящие в них величины. Для рассмотренного нами случая найдено, что $A=0,598$ и $K=0,604$, а уравнение сглаженной кривой имеет вид:

$$\frac{\rho_0^2}{\rho^2} = 0,604 + 0,598 \cos 2\theta. \quad (4.5)$$

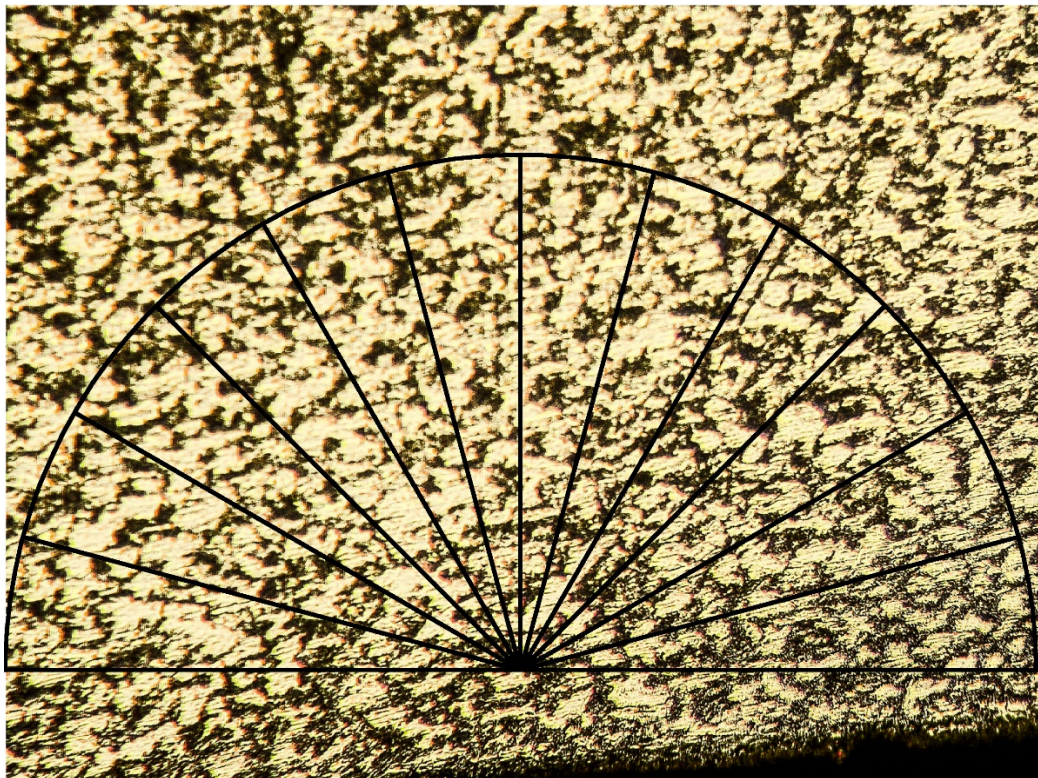
Далее рассчитывались величины $\varepsilon_a = 0,32$; $\varepsilon_b = -0,01$ и $\varepsilon_N = -0,31$. Тогда главные деформации будут $\varepsilon_1 = 0,32$; $\varepsilon_2 = -0,01$ и $\varepsilon_3 = -0,31$, откуда $\varepsilon_i = 0,3676$, а $\nu_\varepsilon \approx 0$.

Для определения главных деформаций в теоретической модельной задаче поступили следующим образом. В точке, сходной с экспериментальной, нашли компоненты деформации по координатным осям компьютерной модели X, Y и Z, откуда заключили, что $\varepsilon_1^T = 0,34$; $\varepsilon_2^T = 0$; $\varepsilon_3^T = -0,33$. По формуле (4.3) нашли $\varepsilon_i = 0,3868$, а $\nu_\varepsilon \approx 0$. Тогда относительная разница теоретического и экспериментального значения $\Delta\varepsilon=4,96\%$.

Подводя итог, отметим, что адекватность теоретических моделей доказана совпадением комплекса ее параметров с экспериментальными результатами, что позволяет рекомендовать разработанные теоретически модели для использования. Кроме того, в проведенных экспериментах получены новые научные результаты.



а



б

Рис. 4.4. Микроструктура металла стенки трубы (x200): а – недеформированное состояние, б – после деформации.

Таблица 4.5.

Зависимость величин радиусов изображения от полярного угла
(исходное состояние).

Номер радиуса	Θ°	ρ_0 в мм	Номер радиуса	Θ°	ρ_0 в мм
0	0	132	7	105	133
1	15	147	8	120	140
2	30	143	9	135	149
3	45	139	10	150	142
4	60	128	11	165	146
5	75	123	12	180	141
6	90	129	ρ_0 среднее = 138 мм		

Таблица 4.6.

Замеренные величины радиусов изображения и расчетные величины
(деформированное состояние).

№ п/п	ρ в мм	Θ°	$\frac{\rho_0^2}{\rho^2}$	$\cos 2\Theta$	$\frac{\rho_0^2}{\rho^2} \cos 2\Theta$	$\cos 4\Theta$
0	136	0	1,029628	1	1,029628	1
1	165	15	0,699504	0,866	0,605771	0,5
2	179	30	0,594363	0,5	0,297182	-0,5
3	176	45	0,614799	0	0	-1
4	169	60	0,666783	-0,5	-0,33339	-0,5
5	162	75	0,725652	-0,866	-0,62841	0,5
6	168	90	0,674745	-1	-0,67474	1
7	177	105	0,607871	-0,866	-0,52642	0,5
8	179	120	0,594363	-0,5	-0,29718	-0,5
9	187	135	0,544597	0	0	-1
10	187	150	0,544597	0,5	0,272298	-0,5
11	189	165	0,533132	0,866	0,461692	+0,5
12	175	180	0,621845	1	0,621845	1
Σ			8,452	1	0,063	1
			Q_K	C_1	Q_A	C_2

4.4. Разработка рекомендаций по совершенствованию процесса профилирования, инструмента и выбору оборудования

4.4.1. Совершенствование процесса и профилирования инструмента

Качество труб и эффективность процесса определяют множество показателей, среди которых основными являются: выбор размеров заготовки и подготовка ее поверхности к волочению, выбор конфигурации рабочего инструмента и способа его изготовления, определение состава оборудования и устройств, в наибольшей степени обеспечивающих эффективность процесса.

Разработанные твердотельные и конечно – элементные модели позволяют найти форму и необходимые размеры готовых труб, а также параметры напряженно – деформированного состояния с большой точностью. На этой основе возможна оценка существующих процессов изготовления ТПТС и проектирование новых процессов, определение места промежуточной термообработки при многопереходных процессах на основе расчета поврежденности металла.

Рассматриваемые профильные трубы имеют некруглую форму наружной или внутренней поверхности, что определяет многие особенности процесса и инструмента.

Выделим следующие элементы совершенствования процесса волочения:

- выбор конфигурации рабочего инструмента;
- выбор размеров заготовки для волочения ТПТС сплошной формы;
- особенности подготовки заготовок к волочению;
- элементы технологии изготовления волочильного инструмента.

Выбор конфигурации рабочего инструмента.

Как было показано выше, в качестве заготовки для волочения применяют круглые трубы, полученные путем горячей или холодной пластической деформации. В процессе волочения эта форма преобразуется в трубу, имеющую заданную форму, точность и размеры. Сложность конфигурации готовой трубы определяет особенности течения металла при

волочении, которая, в свою очередь, определяется последовательностью изменения формы и размеров. Условиями такого изменения являются рациональная траектория преобразования круглой заготовки в трубу заданной формы и размеров.

Действительно, при волочении таких труб происходит течение металла в продольном, тангенциальном и радиальном направлениях, причем соотношение этих величин зависит от многих факторов, среди которых формы и размеры инструмента, трение, вытяжка и др. Учет влияния этих факторов весьма сложен и неоднозначен. В свою очередь, эти же величины определяют усилие волочения, ограничивающее вытяжку за переход. Для ТПТС простой формы или близких соотношений наружного диаметра и толщины стенки заготовки и готовой трубы ее заданная конфигурация может быть получена при однократном волочении, а для ТПТС сложной формы необходимо последовательное приближение к форме готовой трубы, и, следовательно, несколько переходов волочения.

В этой связи определение конфигурации рабочего канала (волока или профильных оправок) следует производить на основе разработанной выше схемы, включающей построение линий тока и эквипотенциалей, которые определяют собой конфигурацию рабочего инструмента и основаны на законе наименьшего сопротивления. При этом для многократного волочения труб с регулярными многоугольниками и с криволинейным очертанием необходимо построение конфигурации промежуточных переходов волочения, обеспечивающих плавный переход от заготовки к готовой трубе и имеющих криволинейные очертания.

Продольный профиль инструмента следует выполнять в виде линейчатых поверхностей, описываемых регулярными коноидами (для правильных многогранников) или в виде цилиндров для криволинейного сечения труб.

Выбор размеров заготовки для волочения ТПТС сложной формы.

Выше рассмотрены особенности формоизменения при волочении ТПТС. Выбор размеров заготовки (наружного диаметра и толщины стенки) следует выполнять на основе предложенной процедуры определения этих величин. При таком выборе следует учитывать, что размеры трубной заготовки должны по возможности соответствовать имеющимся ГОСТам. Этими же стандартами определяются допуски на размеры.

Расчеты показали, что при весьма значимых отклонениях размеров заготовки от определенных по разработанной методике возникают искажения формы труб с переменной по периметру толщиной стенки. Следовательно, необходимо использование заготовки повышенной точности или ее предварительная калибровка по наружному диаметру.

Особенности подготовки заготовки к волочению.

Волочение ТПТС производится на оправке, причем течение металла отличается от осесимметричного. Наличие двух контактных поверхностей трения и дополнительных сдвигов, вызванных несимметричностью очага деформации, приводит к увеличению усилия волочения и снижению запаса прочности переднего конца трубы, выходящего из волоки.

Следовательно, актуальными являются меры как по снижению усилия волочения, так и по повышению запаса прочности переднего конца за счет повышенных механических свойств металла этого участка. Всемерное снижение усилия волочения может быть достигнуто за счет:

- снижения трения на основе качественной подготовки поверхности заготовки путем нанесения стабильных подмазочных слоев и применения эффективной смазки, отвечающей условиям волочения, а также использование гидродинамической ее подачи в очаг деформации;
- применение подвижной оправки взамен неподвижной;
- использование подвижных контактных поверхностей на наружной поверхности трубы (роликовые оправки);

- применение иных способов и устройств, снижающих трение (вибрационное волочение и др.)
- применение заднего подпора трубы.

Снижение трения достигается также путем использования твердосплавного инструмента, закалки металла до высокой твердости при использовании стального инструмента и высокой чистоты поверхности контактной зоны.

Запас прочности переднего конца трубы может быть увеличен за счет использования холодной деформации при забивке, а также применением его рациональной формы. В частности, для тонкостенных труб необходимо получать цилиндрическую форму захватки с плавным коническим переходом к основному телу трубы, а для тонкостенных труб формировать захватку в виде «трефа» с плотным смыканием стенок внутри.

Элементы технологии изготовления волочильного инструмента.

Поскольку диапазон размеров труб с переменной толщиной стенки весьма велик, то следует выделить два типа технологий изготовления. Их особенности определяются абсолютными размерами протягиваемых труб:

- трубы малого и среднего диаметра (до 50 мм). В этом случае возможно использование твердосплавного материала;
- трубы диаметром больше 50 мм. Изготовление такого инструмента производится из термообработанной инструментальной стали. Изготовление волок наиболее сложно.

Для труб первого типа технология должна предусматривать формование твердосплавной части из порошка, и в определенной мере отражать будущий профиль волочильного канала для последующей чистовой обработки. Для труб второго типа изготовления волок производится из сплошной заготовки и необходима предварительная формообразующая операция, которая осложняется необходимостью изготовления профильного отверстия сложной формы.

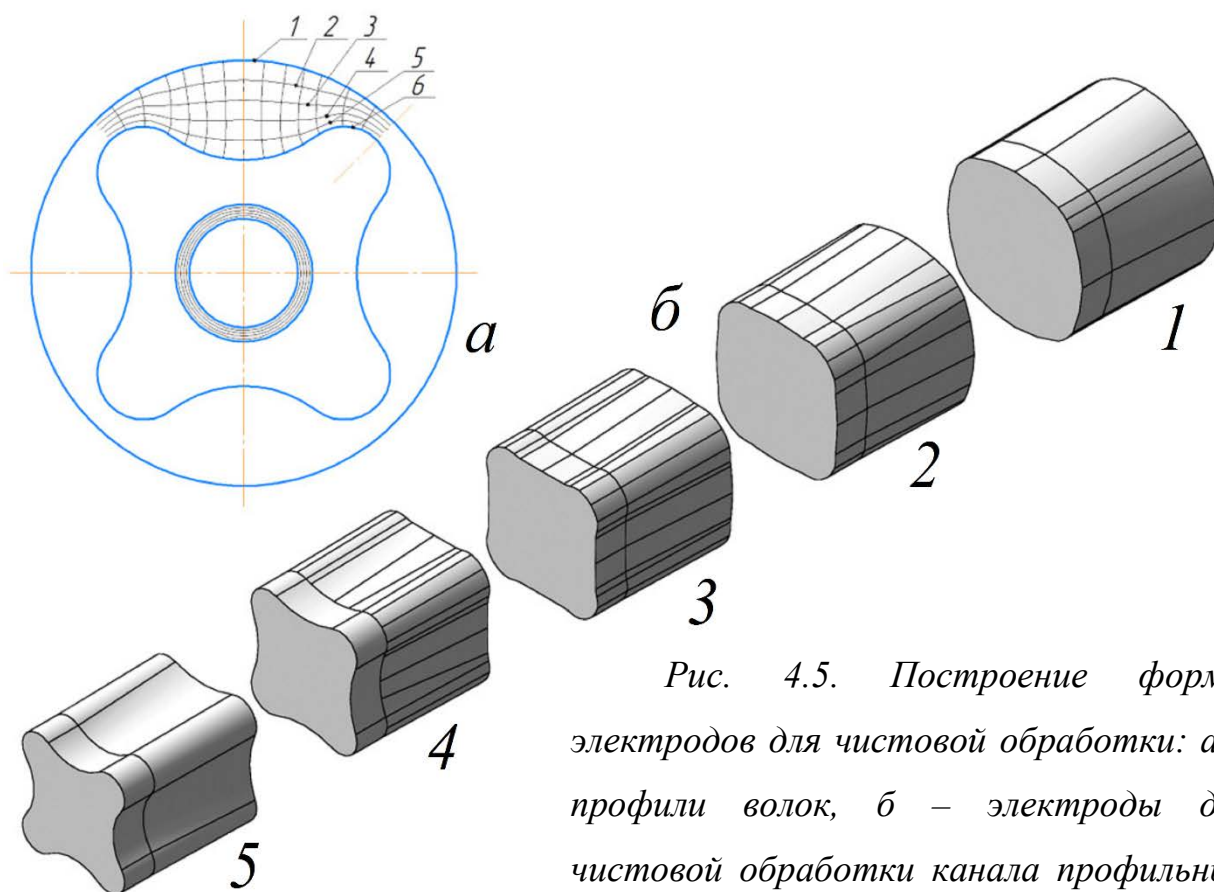


Рис. 4.5. Построение формы электродов для чистовой обработки: а – профили волок, б – электроды для чистовой обработки канала профильных волок: 1-5 – переходы волочения.

Для этого может быть применено предварительное сверление с последующим получением профильного отверстия (например, фрезерованием, протягиванием и др.).

Ранее в работе разработана методика моделирования процессов профилирования труб, что позволяет создать объемные модели рабочего канала, поскольку имеется его 3D-описание. На этой основе возможна разработка технологии механической или иной станочной обработки. Так, например, можно создать программы для черновой обработки резанием на станках с ЧПУ, а чистовую обработку выполнять путем электрохимической, электроискровой и электроэрозионной обработки, изготовив необходимый электрод. Рекомендовано применить такую процедуру определения размеров и формы такого электрода: задают входное сечение волокна, соответствующее готовому изделию. На этой основе строят модель инструмента и с использованием этой модели выполняют вычислительный эксперимент, по

результатам которого уточняют размеры и форму выходного сечения волокни. Итерации производят до получения готового изделия, соответствующего техническому заданию. Размеры волоочильного канала в заключительном виде принимают как модель электрода для чистовой обработки канала волокни. Пример инструмента для изготовления волок при многопереходном волочении криволинейных в поперечном сечении труб приведен на рис. 4.5.

Для изготовления оправок может применяться весь спектр технологии обработки резанием – фрезерование (в том числе на станках с ЧПУ), точение, абразивная обработка (в том числе шлифование).

4.4.2. Выбор оборудования

Изготовление труб с переменной толщиной стенки может производиться на серийных волоочильных станах, оборудованных устройствами для подачи внутрь трубы неподвижной оправки или на станах длиннооправочного волочения. Вместе с тем, следует рекомендовать применение устройств, позволяющих повысить эффективность этого процесса. В частности, это может быть осуществлено при использовании стана длиннооправочного волочения с последующим извлечением оправки, а также применением ковочной машины для получения захваток, а также при использовании проталкивателя концов труб перед волочением и при использовании самоустанавливающейся волокни. Рассмотрим каждое из этих устройств подробнее.

Стан для волочения труб на подвижной оправке. Стан (рис. 4.6, 4.7) содержит загрузочный стол 1, рабочий стол 2, воспринимающий усилие волочения, ролики по входной стороне стана 3, механизм запрессовки трубы в волоку 4, стойку волок 5, механизм обкатки трубы 6, механизм упора труб 7, волоочильную тележку 8, главный привод 9 с тяговыми цепями 10, механизм подачи и извлечения оправки 11 [113].

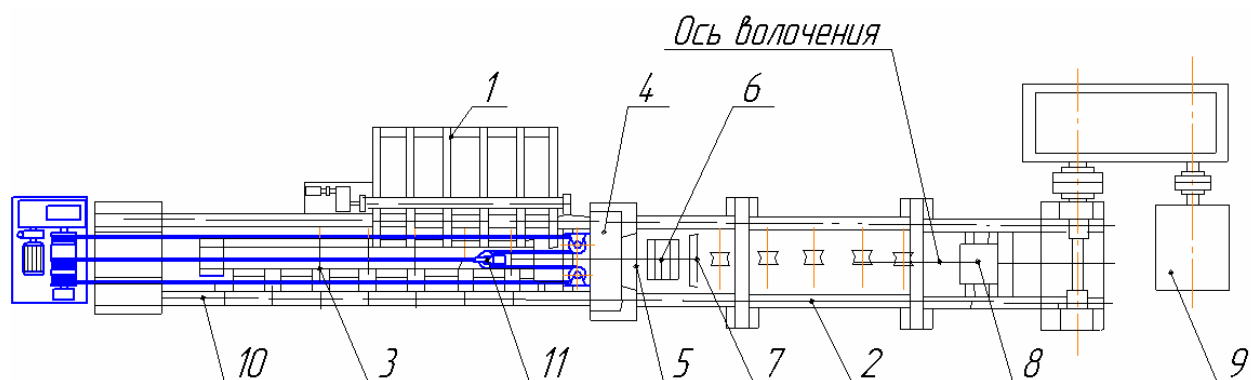


Рис. 4.6. Схема стана, использующего предложенную конструкцию оправки.

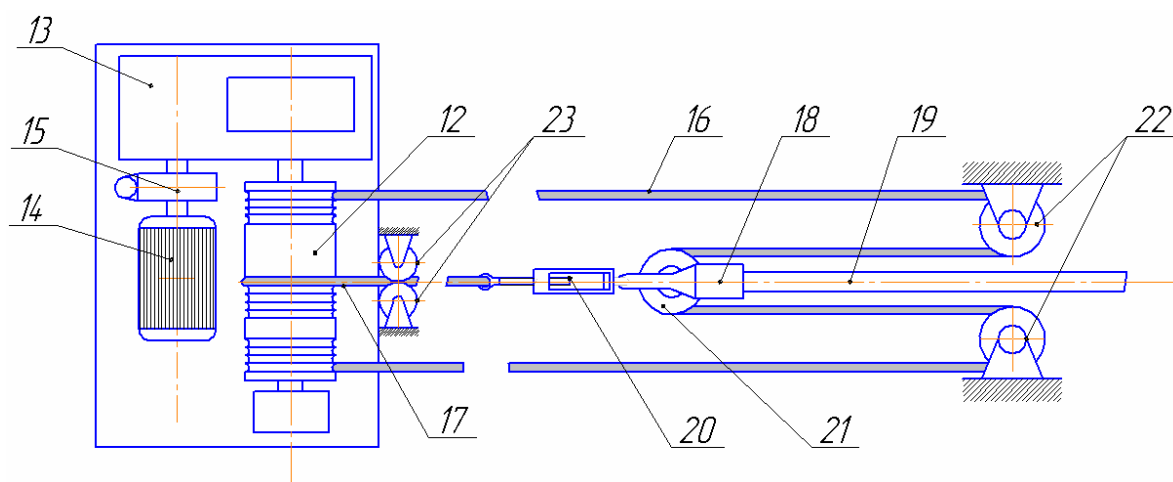


Рис. 4.7. Схема механизма подачи и извлечения оправки.

Собственно механизм подачи и извлечения оправки (рис. 4.7) содержит приводной барабан 12, который через редуктор 13 приводится во вращение от электродвигателя 14. Между редуктором и барабаном установлен тормоз 15. На тяговый барабан 12 уложены тяговые 16 и возвратная 17 ветви канатного привода. Канат возвратного привода 17 соединен с захватом 18, в котором размещен задний конец подвижной оправки 19. Канат возвратного привода 17 соединен с захватом 18 через натяжной механизм 20, захват 18 оправки снабжен уравнивающим блоком 21. Тяговый канат 16 охватывает обрабатываемые блоки 22, установленные у механизма запрессовки трубы 4. Поскольку канаты 16 и 17 совместно с приводным барабаном 12 образуют замкнутую систему, то после закрепления канатов в диаметрально противоположных точках *A* и *B* барабана устраняют зазор в этой системе путем использования натяжного механизма 20. На канат возвратного привода

17 вблизи приводного барабана 12 установлен неподвижный направляющий механизм 23, который предназначен для направления возвратного каната 17 строго по оси волочения. Размещение канатов на приводном барабане 12 такое: канат возвратного привода 17 контактирует с этим барабаном в т. А, а канат тягового привода в т. В, т.е. в точках, отстоящих по углу одна от другой 180°.

Подвижная оправка волочильного стана содержит среднюю часть, на которой выполняется процесс пластической деформации трубы, переднюю утоненную часть для его пропуска через механизмы запрессовки, раскатки и захвата волочильной тележкой, а также заднюю часть, закрепленную в захвате 18 (рис. 4.7).

Число канатов тягового привода с целью достижения необходимого допустимого усилия может быть больше двух. В таком случае для каждого из тяговых канатов у стойки волок устанавливается обрабатывающий блок, а для каждой пары канатов на захвате подвижной оправки устанавливается уравнивательный блок. В частном случае число канатов тягового привода может быть нечетным, тогда один из канатов после прохода через обрабатывающий блок, своим концом крепится непосредственно к захвату подвижной оправки. Таким образом, число уравнивательных блоков равно целому от деления числа канатов тягового привода на два (т. е. уравнивательные блоки установлены для всех парных канатов тягового привода). Наряду с использованием канатов в рассмотренном приводе могут применяться гибкие связи известных видов, например, цепи, гибкие ленты, ремни или проволока.

Рассмотрим процесс однократного волочения трубы с извлечением оправки после окончания волочения. При этом стан работает следующим образом. В исходном положении подвижная оправка 19 при помощи каната 17 возвратного привода перемещается в крайнее заднее относительно стойки волок 5 положение. При этом работает электродвигатель 14, редуктор 13 и вращается против часовой стрелки приводной барабан 12. Канат 17 наматывается на барабан 12, а канат тягового привода 16 разматывается с барабана 12.

Труба с загрузочного стола 1 перемещается в поперечном относительно оси волочения направлении и оказывается на оси волочения. Ролики на входной стороне стана 3 транспортируют трубу к механизму запрессовки трубы в волоку 4. Далее включают механизм подачи оправки 19 в трубу. Вращение приводного барабана 12 производится по часовой стрелке. При этом канат 17 разматывается с барабана 12, а канаты 16 наматываются на барабан, и оправка 19 подается внутрь трубы. При этом утоненный конец подвижной оправки проходит через механизм запрессовки 4, стойку волок 5, механизм обкатки трубы 6 и механизм упора труб 7.

После этого волочильная тележка 8 захватывает вышедший из механизма упора труб 7 конец оправки и при помощи тяговых цепей 10 и главного привода 9 совершает рабочий ход (процесс волочения). Одновременно производится обкатка по наружной поверхности трубы механизмом 6 для ее легкого отделения от оправки. После прохода задним торцом трубы механизма упора труб 7 процесс волочения заканчивается. Во время работы главного привода механизм подачи оправки синхронно с ним производит размотку каната 17 и смотку канатов 16. Далее механизм 7 фиксирует задний конец трубы и реверсом механизма подачи и извлечения оправка 19 извлекается из трубы и подается в исходное (крайнее заднее) положение. Протянутая труба убирается с оси волочения, волочильная тележка 8 возвращается к механизму 7 и стан готов к повторному волочению.

На предлагаемом стане можно осуществлять несколько режимов работы. По описанной выше схеме работы осуществляется процесс волочения трубы на подвижной оправке с возвратом оправки в исходное положение для загрузки ее в трубу (режим I). Назовем режимом II такой, при котором механизм подачи оправки удерживает оправку при осуществлении процесса волочения, и последняя движется несколько медленнее, чем перемещается труба. Это позволяет уменьшить длину оправки, причем волочильная тележка должна осуществить захват за трубу. При работе в режиме III может быть осуществлено волочение в несколько проходов, без съема трубы с оправки на промежуточных переходах волочения. Так, например, по схеме работы,

описанной выше (режим I) первый переход волочения производят с использованием разъемной волоки. После окончания волочения волоку раскрывают, и трубу с оправкой не снимают, а возвращают назад в положение перед началом волочения. В стойку волок устанавливают волоку меньшего размера, и процесс волочения повторяют. Таким образом, стан предложенной конструкции позволяет также расширить технологические возможности процесса волочения труб на подвижной оправке.

Указанная конструкция, применительно к производству профильных труб, может быть использована для получения высокоточных труб волочением на оправке. В частности, волочением на оправке могут производиться трубы с многогранным профилем (шестигранные, квадратные, прямоугольные), в том числе, общего назначения, а также специальные высокоточные трубы.

Ковочная машина.

Радиально-ковочная машина рычажного типа AVS конструкции фирмы «Czepel» приведена на рис. 4.8.

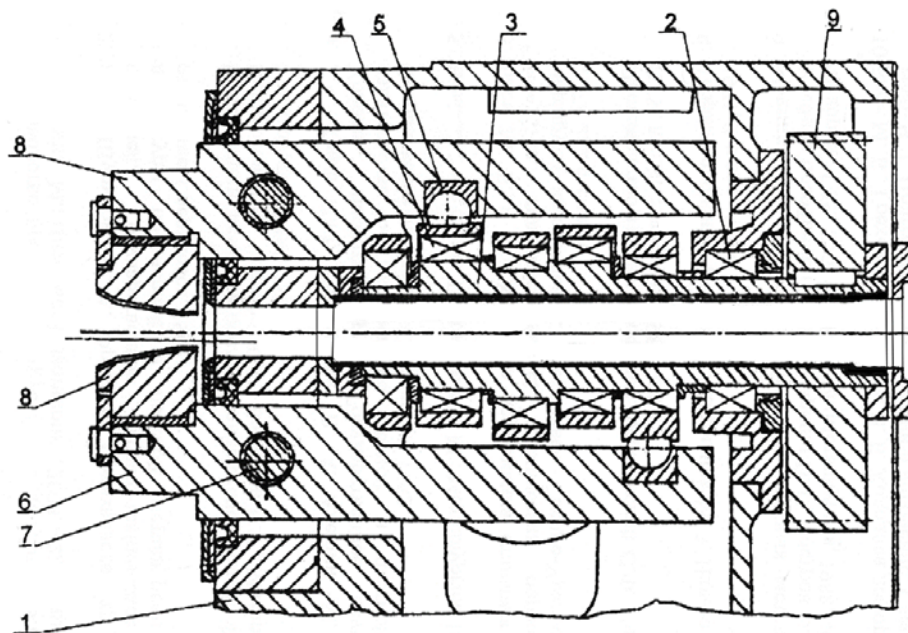


Рис. 4.8. Привод бойков ковочной машины.

В корпусе машины 1 на подшипниках качения 2 установлен полый эксцентричный вал 3. На наружных ступенчатых шейках этого вала размещены четыре подшипника 4, которые взаимодействуют с толкателями 5 качающихся рычагов 6, установленных на осях 7. Эти рычаги содержат установленные на них ковочные бойки 8. Вращение полого вала осуществляется через шкив 9 клиноременной передачи. Возврат рычагов производится пружинами с регулируемой затяжкой (на рис. 4.8 не показаны). Следует отметить, что с целью смягчения жестких ударов в приводе рассмотренных выше машин используется передача с клиновыми ремнями.

Эта конструкция была переработана в соответствии с патентом [114], изготовлена и используется на Первоуральском новотрубном заводе.

Ковочная машина позволяет осуществить автоматизированную работу по заковке концов труб вхолостую, обеспечивая для толстостенных труб получение цилиндрической захватки с переходным участком, определяемым формой бойков 8. Для заковки тонкостенных труб могут быть использованы бойки, имеющие специальные гребни – выступы, позволяющие получать захватки в виде «трефа» с плотным смыканием стенок, что обеспечивает повышенную прочность этого участка трубы. Возможна заковка труб под двухпроходное волочение.

Проталкиватель концов труб.

Механизм проталкивателя стана 150 кН конструкции ИЗТМ [115] содержит в своем составе литой корпус стойки волок 1, в котором смонтирован механизм проталкивания и доска волок 2 (рис. 4.9). Этот механизм состоит из каретки 3, установленной на направляющих корпуса и связанной с холостой звездочкой 4 тяговой цепи посредством кулисного механизма 5. Возвратно – поступательное движение каретка получает при вращении холостой звездочки, на валу которой смонтирован кулачковый механизм 6. Каретка имеет вертикальные клиновые пазы, в которых помещаются плашки 7 со сменными губками 8.

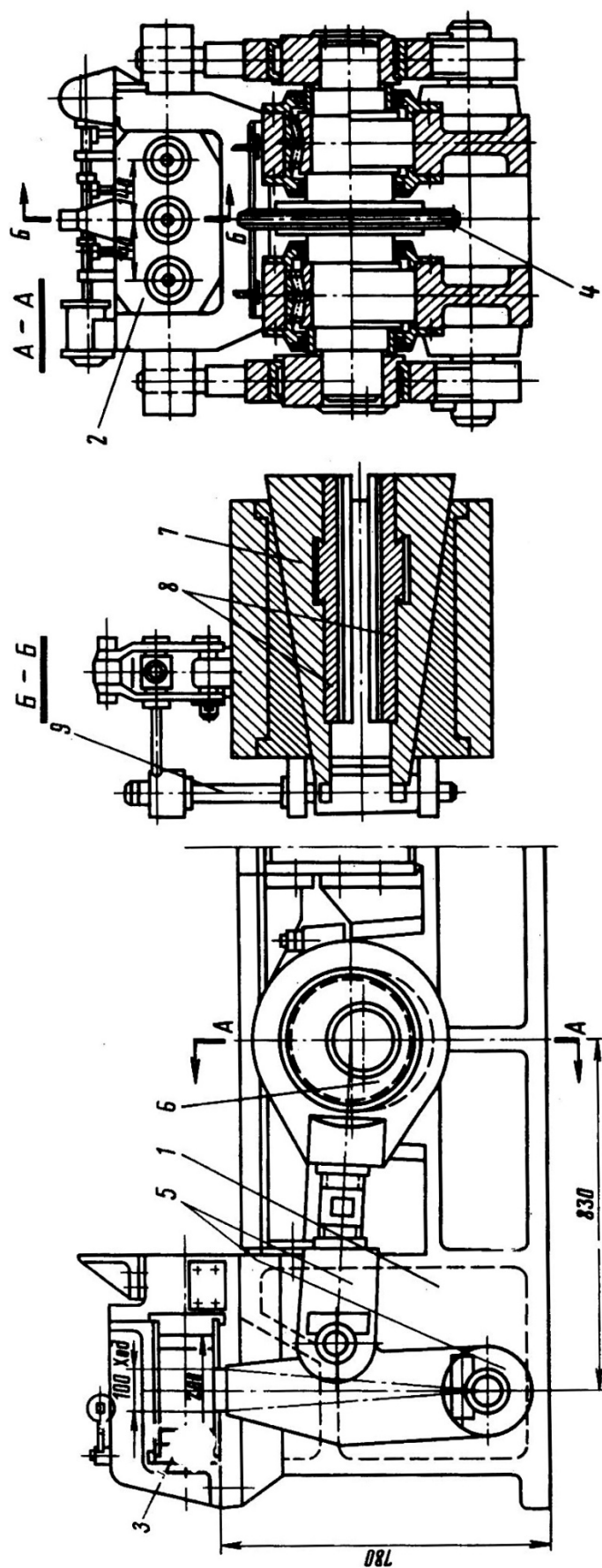


Рис. 4.9. Проталкиватель стана 150 кН.

Движение плашек осуществляется пневмоцилиндром через систему рычагов 9. В доске волок устанавливается волочилый инструмент и направляющие воронки.

Проталкиватели, расположенные в линии стана или вынесенные за пределы линии волочения и обеспечивающие эту операцию позволяют повысить производительность, сократить производственные площади, получать передний конец трубы повышенной прочности.

Применение самоустанавливающейся волоки.

Расчеты показали, что смещение оси заготовки на входе в волоку от оси волочения в тангенциальном или в радиальном направлениях приводит к разностенности готовых труб. Следовательно, необходимо центрирование заготовки, что может быть выполнено, например, применением самоустанавливающейся волоки. Другой способ состоит в том, что перед профильным участком волоки следует размещать дополнительный конический участок, который позволяет улучшить центрирование и снизить усилие волочения вследствие создания противонапряжения. Возможна также установка конической центрирующей волоки на входе в очаг деформации.

4.5 Выводы по главе 4

1. Твердотельное и конечно – элементное моделирование следует проверять на адекватность различным условиям волочения на основе экспериментального исследования путем сравнения геометрических параметров получаемых труб и определения деформированного состояния металла.

2. Примененная методика и оборудование для выполнения экспериментальных исследований достаточно точно отражает реальные условия профилирования труб, причем проведенные статистические расчеты обосновывают этот вывод.

3. Для сравнения результатов экспериментального и теоретического исследований применен метод определения деформированного состояния, основанный на изучении микроструктуры металла в характерных точках профиля трубы. Результаты сравнения позволяют заключить, что точность исследования является приемлемой.

4. Предложенный набор технологических приемов и предложенный состав оборудования позволяют повысить эффективность процесса получения профильных труб с переменной толщиной стенки волочением на оправке.

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. Рассмотрены способы и устройства, имеющие на настоящее время широкое использование, сортамент получаемых профильных труб, выполнен обзор известных методов построения калибровки рабочего инструмента и определения параметров заготовки для волочения сплошных фасонных профилей. Изучены методы определения напряженно – деформированного состояния при волочении, нахождения поврежденности металла и тягового усилия при волочении круглых труб на оправке и простых сплошных фасонных профилей.

На этой основе выполнена постановка задач теоретического и экспериментального исследования.

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 с плоскостной симметрией.

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.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паршин, С.В. Процессы и машины для изготовления профильных труб / С.В.Паршин. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. - 356 с.
2. Карасев, М.А. Кузнечно – прессовое оборудование Уралмашзавода / М.А.Карасев, И.В.Баранов, Ф.С.Блик и др. – Екатеринбург: Марат, 2004 - 480 с.
3. Гуляев, Г.И. Прессование стальных труб и профилей / Г.И. Гуляев и др. - М.: Металлургия, 1973. - 192 с.
4. Данилов, Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. - М.: Металлургия, 1972. - 576 с.
5. Ткаченко, В.А. Трубы для нефтяной промышленности / В.А.Ткаченко и др. - М.: Металлургия, 1988. - 256 с.
6. Шевакин, Ю.Ф. Параметры прокатки полых квадратных штанг для бурения / Ю.Ф.Шевакин, Б.Н.Матвеев, Г.А.Карпов и др. // М.: Металлург. - 1969. - № 4, - С.28.
7. Чечулин, Ю.Б. Холодная прокатка труб / Ю.Б.Чечулин, Л.А.Кондратов, Г.А.Орлов. - М.: Металлургиздат, 2017. - 332 с.
8. Данченко, В.Н. Производство профильных труб / В.Н. Данченко, В.В.Сергеев, Э.В.Никулин. - М: Интермет Инжиниринг, 2003. - 224 с.
9. Дорохов, А.И. Изготовление фасонных труб с переменной толщиной стенки в поперечном сечении / А.И.Дорохов // Бюл. УкрНИТИ. - № 6-7. - М.: Металлургиздат. -1959. -С.78-82.
- 10.Шурупов, А.К. Производство труб экономичных профилей / А.К.Шурупов, М.А.Фрейберг. - Свердловск: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии. Свердловское отделение, 1963. - 296 с.
- 11.Биск, М.Б. Холодная деформация стальных труб: в 3 т. / М.Б.Биск, И.А.Грехов, В.Б.Славин. – Свердловск: Средне-уральское книжное издательство, 1976. - 236 с. – 3 т.

12. Выдрин, В.Н. Производство фасонных профилей высокой точности / В.Н.Выдрин, А.Б.Гроссман, В.К.Павлов и др. - М.: Металлургия, 1977. - 184 с.
13. Petzold, K.M., Mandl A. "Neue Hute" / by K.M.Petzold, A.Mandl, 1965, №1, p. 658-665.
14. Grenlich, U. – "Wire World Internationals" / by U.Grenlich, 1963, v.3, №6, p. 322-325.
15. Хохряков, В.Д. Закрытые подъемные канаты / В.Д.Хохряков. - М.: Металлургиздат, 1963. - 60 с.
16. Гроссман, Х.Б. Информация ин-та «Черметинформация» / Х.Б.Гроссман, Г.И.Савчук, В.К.Павлов // М.: Изд-во «Черметинформация». - 1968. - Сер.9. - Вып. 8. - С.11-12.
17. Панасенко, С.П. Бюл. ин-та «Черметинформация» / С.П.Панасенко, Ю.А.Кашин // М.: Изд-во «Черметинформация». – 1968. - № 8. - .37.
18. Абдульманов, Ф.З. Информация ин-та «Черметинформация» /Ф.З.Абдульманов, И.Ф.Махнев» // М.: Изд-во «Черметинформация». – 1968. - Сер.9. - Вып. 8. - С.7-10.
19. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л.Перлин, М.З.Ерманок. - М.: Металлургия, 1971. - 448 с.
20. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я.Гун. - М.:Металлургия, 1980. - 456 с.
21. Гун, Г.Я. Пластическое формоизменение металлов / Г.Я.Гун, П.И.Полухин, В.П.Полухин и др. - М.: Металлургия, 1968. - 416 с.
22. Фильчаков, П.Ф. Интеграторы ЭГДА (Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге) / П.Ф.Фильчаков, В.И.Панчикин. - Киев: АН УССР, 1961. - 172 с.
23. А.с. СССР № 279184, 21.08.1970. Выдрин В.Н., Гроссман А.Б., Свинов В.М. и др. Устройство для построения калибровок инструмента // «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки». 1970. Бюл. № 26.

- 24.Зюзин, В.И. Станы для производства специальных фасонных профилей за рубежом / В.И.Зюзин. - М.: НИИинформтяжмаш, 1970. - 62 с.
- 25.Никулин, Э.В. Определение толщины стенки исходной заготовки для холодной прокатки ребристых труб / Э.В.Никулин, А.И.Дорохов, А.Л.Иванов // Производство труб повышенного качества. – М.: Металлургия, 1990. - С. 42-47.
- 26.Хилл, Р. Математическая теория пластичности (пер. с англ.) / Р.Хилл. - М.: ГИТТЛ, 1956. - 407 с.
- 27.Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В.Соколовский. - М.: Высшая школа. 1969. - 608 с.
- 28.Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д.Томленов. - М.: Металлургия, 1972. - 408 с.
- 29.Смирнов-Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А.Смирнов-Аляев. - М.: Машиностроение, 1968. - 272 с.
- 30.Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформациям / Г.А.Смирнов-Аляев. - М.: МАШГИЗ, 1961. - 296 с.
- 31.Смирнов – Аляев, Г.А. Элементарные основы теории обработки металлов давлением / Г.А.Смирнов-Аляев. - М.: МашГИЗ, 1957. - 163 с.
- 32.Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И.Губкин. - М.: Металлургиздат, 1947. - 320 с.
- 33.Унков, Е.П. Теория пластических деформаций металлов / Е.П.Унков и др. - М.: Машиностроение, 1983. - 598 с.
- 34.Унков, Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением / Е.П. Унков. - М.: Машгиз, 1955. - 278 с.
- 35.Шапиро, В.Я. Бухтовое волочение труб / В.Я.Шапиро, В.И.Уральский. - М.: Металлургия, 1972. - 264 с.
- 36.Выдрин, В.Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н.Выдрин, А.С.Федосиенко, В.М.Крайнов. - М.: Металлургия, 1970. - 286 с.
- 37.Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В.Сторожев, Е.А.Панов. - М.: Машиностроение, 1971. - 424 с.

38. Шевченко, А.А. Совершенствование процессов и оборудования для производства холоднодеформированных труб / А.А.Шевченко, Е.А.Резников, Л.С. Ляховецкий и др. - М.: Металлургия, 1979. - 240 с.
39. Тарновский, И.Я. Теория обработки металлов давлением. Вариационные методы расчета усилий и деформации / И.Я.Тарновский, А.А.Поздеев, О.А.Ганаго и др. - М.: Металлургиздат, 1983. - 416 с.
40. Гун, Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г.Я.Гун. - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.
41. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л.Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. - 836 с.
42. Чекмарев, А.П. Теория трубного производства / А.П.Чекмарев, В.М.Друян. - М.: Металлургия, 1976. - 304 с.
43. Паршин, В.С. Холодное волочение труб / В.С.Паршин, А.А.Фотов, В.А.Алешин. - М.: Металлургия, 1979. - 240 с.
44. Соколовский, В.И. Непрерывные калибровочные станы / В.И.Соколовский, В.С.Паршин, Г.Л.Баранов. - М.: Металлургия, 1984. - 96 с.
45. Перциков, З.И. Волочильные станы / З.И.Перциков. - М.: Металлургия, 1986. - 208 с.
46. Юхвец, И.А. Волочильное производство / И.А.Юхвец. - М.: Металлургиздат, 1965. - 375 с.
47. Когос А.М. Механическое оборудование волочильных и лентопрокатных цехов / А.М.Когос. - М.: Металлургия, 1980. - 311 с.
48. Паршин, С.В. Совершенствование процессов и машин для изготовления холоднодеформированных труб на основе моделирования очага деформации: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.05. /Паршин Сергей Владимирович. - Екатеринбург: 2009. - 367 с.
49. Леванов, А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н.Леванов, В.Л.Колмогоров, С.П.Буркин и др. - М.: Металлургия, 1976. - 416 с.

- 50.Добров, И.В. Развитие энергетического метода расчета силовых параметров процесса волочения полосы в монолитной волоке / И.В.Добров // Производство проката. – 2016. - №2. - С. 36-44.
- 51.Храмков, Е.В. Повышение эффективности изготовления труб на основе физического и математического моделирования процесса редуцирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Храмков Евгений Владимирович. - Челябинск, 2017. - 23 с.
- 52.Семенова, Н.В. Моделирование процесса профилирования многогранных труб с целью его совершенствования и выбора параметров стана: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Семенова Наталья Владимировна. - Екатеринбург, 2005. - 217 с.
- 53.Окулов, Р.А. Совершенствование процессов профилирования граненых труб на основе моделирования очага деформации с целью повышения их точности: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.03 / Окулов Роман Александрович. - Екатеринбург, 2015. - 152 с.
- 54.Шокова, Е.В. Совершенствование процесса профилирования многогранных труб безоправочным волочением: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 /Шокова Екатерина Викторовна. - Самара, 2005. - 155 с.
55. 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>
- 56.Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация (пер. с англ. Б.И. Квасова)/ О.Зенкевич, К.Морган. - М.: Мир, 1986. - 318 с.
- 57.Оден, Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред (пер. с англ.) / Дж. Оден. - М.: Мир, 1976. - 463 с.
- 58.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.

59. 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.
60. 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.
61. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики / Д.Роджерс, Дж.Адамс. - М.: Мир, 2001. - 604 с.
62. Фокс, А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт. - М.: Мир, 1982. – 304 с.
63. 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.
64. Паршина, А.А. Определение профиля рабочего инструмента для волочения труб с переменной толщиной стенки / А.А.Паршина // Производство проката. – 2017. - №3. - С.36-48.
65. 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.
66. 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.

67. 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.
68. Алберг, Дж. Теория сплайнов и ее приложения. Пер. с англ. Ю. Н. Субботина / Дж.Алберг, Э.Нильсон, Дж.Уолш. - М.: Изд-во «Мир», 1972. - 312 с.
69. Корнейчук, Н.П. Экстремальные свойства полиномов и сплайнов / Н.П.Корнейчук, В.Ф.Бабенко, А.А.Лигун. - Киев: Наукова думка, 1992. - 304 с.
70. Вершинин, В.В. Экстремальные свойства сплайнов и задача сглаживания / В.В.Вершинин, Ю.С.Завьялов, Н.Н.Павлов. - Новосибирск: Наука, 1988. - 104 с.
71. Шикин, Е.В. Кривые поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. / Е.В.Шикин, Л.И. Плис. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. - 240 с.
72. Спиридонов, В.А. Моделирование трубоволоочильного инструмента при волочении многогранных труб из цветных металлов на неподвижной оправке / В.А.Спиридонов, Е.А.Митюшов // ИВЦМ. -2013. -№ 5. - С. 41-46.
73. 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.
74. Митюшов, Е. А. Математические основы компьютерной геометрии: учеб. пособие / Е.А.Митюшов, Л.Л.Митюшова. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. - 60 с.

75. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Л.М.Качанов. - М.: Наука, 1969. - 420 с.
76. Богатов, А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А.А.Богатов. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. - 283 с.
77. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И.Полухин, Г.Я.Гун, А.М.Галкин. - М.: Металлургия, 1967. - 488 с.
78. Колмогоров, В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение / В.Л.Колмогоров. - М.: Металлургия, 1970. - 229 с.
79. Богатов, А. А. Ресурс пластичности при обработке металлов давлением / А.А.Богатов, О.И.Мижирицкий, С.В.Смирнов. - М.: Металлургия, 1984. - 144 с.
80. Смирнов, С.В. Исследование пластического разрыхления металла и заживление деформационных дефектов при отжиге / С.В.Смирнов, А.А.Богатов, В.Л.Колмогоров // Физика металлов и металловедение. - 1980. - Т. 49. - Вып. 2. - С. 389-393.
81. Богатов, А.А. Изучение особенностей деформируемости металла при многооперационной холодной деформации с промежуточными отжигами / А.А.Богатов, С.В.Смирнов, В.Л.Колмогоров // ИВЧМ. - 1979. - № 12. - С. 43-46.
82. Смирнов, С.В., Швейкин В.П. Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением / С.В.Смирнов, В.П. Швейкин. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. - 256 с.
83. 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.
84. Колмогоров, В.Л. Гидродинамическая подача смазки / В.Л.Колмогоров, С.И.Орлов, Г.Л.Колмогоров. - М.: Металлургия, 1975. - 256 с.
85. Секулович, М. Метод конечных элементов / М.Секулович. М.: Стройиздат, 1993. - 664 с.

86. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы. (пер. с англ.) / Р. Галлагер. - М.: Мир, 1984. - 428 с.
87. Gadala M.S., Wang J. Simulation of Metal Forming Processes with Finite Element Methods / International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. - vol.44. - P.1397-1428.
88. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация (пер. с англ.) / О. Зенкевич, К. Морган. - М.: Мир, 1981. - 304 с.
89. McMeeking R.M., Rice J.R. Finite Element Formulations for Problems of Large Elastic-Plastic Deformation // International Journal of Solids and Structures, 1975. - vol.121. - P.601-616.
90. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis, Cambridge University Press, 1997.
91. Оден, Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред (пер. с англ.) / Дж. Оден. - М.: Мир, 1976. - 463 с.
92. COSMOS/M User Guide. Version 2.95, Structural Research and Analysis Corporation, Los Angeles, 2007.
93. Raghu S. Finite Element Modelling Techniques: In MSC. NASTRAN and LS/DYNA. / by S. Raghu. - CreateSpace Independent Publishing Platform, 2010. 171 p.
94. Городецкий, С.А. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / С.А. Городецкий, В.И. Завороцкий, А.И. Лантух-Лященко, А.О. Рассказов. - М.: Транспорт, 1981. - 143 с.
95. Logan D.L. A First Course in the Finite Element Method Using Algor / by D.L. Logan. - Brooks/Cole Publishing Company, 2001. 974 p.
96. Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов. - М.: Компьютер Пресс, 2002. - 224 с.
97. Харитонов, В.В. МКЭ – расчет изменения толщины стенки трубы при безоправочном волочении / В.В. Харитонов, С.В. Смирнов, Д.И. Вычужанин // В сб. «Достижения в теории и практике трубного производства», Екатеринбург, 2004. - С.135-139.

98. Восканьянц, А.А. Исследования процесса холодной поперечно – винтовой прокатки на трехмерной конечно – элементной модели / А.А.Восканьянц, А.В.Иванов, Е.И.Панов // В сб. «Непрерывные процессы обработки давлением», М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2004.
99. Расчетные работы и инженерный консалтинг. Проспект фирмы «CADFEM». Сб. «Расчеты», 2002. - №4.
100. Готлиб, Б.М. Автоматизированные кузнечно - прессовые комплексы (опыт создания и эксплуатации) / Б.М.Готлиб, И.А.Добычин, М.Б.Готлиб. - Екатеринбург: Изд. УрГАПС, 1998. – 647 с.
101. Дмитриев, А.М. Об использовании метода конечных элементов / А.М.Дмитриев, А.Л.Воронцов // Непрерывные процессы обработки давлением. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – С.86.
102. Барулина, М.А. Использование ANSYS WORKBENCH для работы с геометрическими моделями / М.А.Барулина. - М.: Эдитус, 2012. - 316 с.
103. Присекин, В.Л. Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел: учебник / В.Л.Присекин, Г.И.Расторгуев. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. - 238 с.
104. Moaveni S. Finite Element Analysis. Theory and Application with ANSYS / by S. Moaveni. - Minnesota State University, Mankato, Pearson Prentice-Hall, Inc., 2008.
105. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К.А.Басов. - М.: ДМК Пресс, 2006. - 248 с.
106. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки). Учебно-методическое пособие / М.В.Илюшкин. - Ульяновск: УлГУ. 2012. - 91 с.
107. Смирнов-Аляев, Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А.Смирнов-Аляев, В.Л.Чикидовский. - М.: Машиностроение, 1972. - 360 с.
108. Паршин, С.В. Определение деформированного состояния НПВТ микроструктурным методом / С.В.Паршин // ИВЧМ. - 2008. - № 2. - С.67.

109. Паршин, С.В. Контроль уровня пластических деформаций при изготовлении профильных труб / С.В.Паршин // Контроль. Диагностика. - 2008. - № 3. - С.17-19.
110. Солонин, И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С.Солонин. - М.: Машиностроение, 1972. - 215 с.
111. Иванова, В.Н. Математическая статистика / В.Н.Иванова, В.Н.Калинина, Л.А.Нешумова и др. - М.: Высшая школа, 1981. - 371 с.
112. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н.В.Смирнов, И.В.Дунин – Барковский. - М.: Наука, 1965. - 512 с.
113. Патент РФ №2007111613/02, 27.10.2008. Паршин С.В. Стан для волочения труб на подвижной оправке // Патент России № 2336964. 2007. Бюл. № 30.
114. Пат. РФ на полезную модель №2015121919/02, 10.02.2016. Карамышев А.П., Некрасов И.И., Паршин В.С. и др. Ковочная машина // Патент России на полезную модель №159243. 2016. Бюл. № 4.
115. Калибровочные и трубоволочильные станы. Каталог – справочник. - М.: НИИИнформТяжМаш, 1972. -15 с.
116. Дорохов, А.И. Изготовление фасонных труб с переменной толщиной стенки в поперечном сечении / А.И.Дорохов // Бюл. УкрНИТИ. 1959. - № 6-7. – М. : Metallurgizdat. С.78-82.
117. Спиридонов, В.А. Моделирование трубоволочильного инструмента при волочении многогранных труб из цветных металлов на неподвижной оправке / В.А.Спиридонов, Е.А.Митюшов // ИВЦМ. – 2013. - № 5. - С. 41-46.
118. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики / Д.Роджерс, Дж.Адамс. - М.: Мир, 2001. – 604 с.
119. Лившиц, Е.Д. Непрерывные Е-выборки для приближения полиномиальными и рациональными сплайнами: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.01.01 / Лившиц Евгений Давидович. - М., 2005. - 90 с.

120. Алберг, Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Дж.Алберг, Э.Нильсон, Дж.Уолш. - М: Мир, 1972. - 319 с.
121. Винниченко, Л.Ф. Экспоненциальные гистосплайны: предпосылки введения / Л.Ф.Винниченко // Конференция «Европейская наука XXI века», Publishing house Education and Science s.r.o., 2009.
122. Корнейчук, Н.П. Экстремальные свойства полиномов и сплайнов / Н.П.Корнейчук, В.Ф.Бабенко, А.А. Лигун. - Киев: Наукова думка, 1992. - 304 с.
123. Вершинин, В.В. Экстремальные свойства сплайнов и задача сглаживания / В.В.Вершинин, Ю.С.Завьялов, Н.Н.Павлов. - Новосибирск: Наука, 1988. - 103 с.
124. Роженко, А.И. Теория и алгоритмы вариационной сплайн-аппроксимации: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 01.01.07 / Роженко Александр Иосифович. - Новосибирск, 2003. - 231 с.
125. Шикин, Е.В. Кривые поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей / Е.В.Шикин, Л.И.Плис. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. - 240 с.
126. Хакимов, Б.В. Моделирование корреляционных зависимостей сплайнами на примерах в геологии и экологии / Б.В.Хакимов. - СПб.: НЕВА, 2003. -144 с.