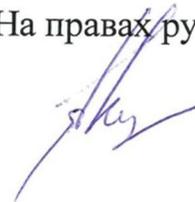


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



Яковлева Ксения Юрьевна

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ
ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ НА САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕЙСЯ
ОПРАВКЕ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Выдрин Александр Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Челябинск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ	16
1.1 Передовые технологии в производстве холоднодеформированных труб волочением	16
1.2 Анализ процесса оправочного волочения как способа изготовления холоднодеформированных труб с заданным внутренним диаметром ...	17
1.2.1 Анализ параметров профилировки самоустанавливающихся оправок известных конструкций	18
1.2.2 Обзор конструкций самоустанавливающихся оправок	21
1.2.3 Анализ существующих технологических и технических решений, обеспечивающих равновесное положение самоустанавливающейся оправки	22
1.2.4 Анализ влияния качества поверхности и трибологических параметров смазочного материала на условия трения	25
1.3 Анализ современного уровня развития теории оправочного волочения	28
1.3.1 Оценка общего уровня исследований и принимаемых допущений	28
1.3.2 Анализ существующих математических моделей напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке	31
1.4 Выводы и постановка задач исследования	33
2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ВОЛОКА – ОПРАВКА – ОЧАГ ДЕФОРМАЦИИ» ДЛЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ НА САМОУСТАНАВЛИВАЮЩЕЙСЯ ОПРАВКЕ	38
2.1 Предварительный анализ и построение концептуальной схемы моделируемой системы	38

2.2 Анализ параметров формоизменения трубы по длине очага деформации	43
2.2.1 Параметры формоизменения на участке редуцирования	44
2.2.2 Параметры формоизменения на участке основного обжатия ...	47
2.2.3 Параметры формоизменения на участке дополнительного обжатия	48
2.2.4 Параметры формоизменения на участке калибровки	49
2.3 Применение инженерного метода для описания напряженного состояния системы «волока – оправка – очаг деформации»	50
2.3.1 Анализ схемы сил, приложенных к участку основного обжатия	51
2.3.2 Анализ схемы сил, приложенных к участку дополнительного обжатия	54
2.3.3 Анализ схемы сил, приложенных к участку калибровки	57
2.4 Вывод линейных неоднородных дифференциальных уравнений равновесия и их анализ	59
2.5 Разработка алгоритма решения системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений равновесия	62
2.5.1 Применение метода конечных элементов	62
2.5.2 Применение метода Бубнова-Галеркина	68
2.6 Численное исследование математической модели системы «волока – оправка – очаг деформации»	82
2.6.1 Анализ влияния степени и сопротивления пластической деформации на напряженное состояние при волочении на самоустанавливающейся оправке	82
2.6.2 Анализ влияния параметров профилировки инструмента на напряженное состояние при волочении на самоустанавливающейся оправке	86
2.6.3 Анализ влияния коэффициента трения на напряженное состояние при волочении на самоустанавливающейся оправке	88

2.7 Выводы	93
3 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ НА САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕЙСЯ ОПРАВКЕ	95
3.1 Исследование сопротивления пластической деформации углеродистой стали	95
3.1.1 Анализ результатов исследования	97
3.2 Исследование вязкости современных смазочных материалов, применяемых при оправочном волочении труб из углеродистой стали ..	100
3.2.1 Анализ результатов исследования	102
3.3 Экспериментальное исследование влияния смазочного материала на качество труб и стабильность процесса волочения на самоустанавливающейся оправке	104
3.3.1 Устройство и технологический инструмент для физического моделирования	104
3.3.2 Проектирование экспериментальных маршрутов волочения на самоустанавливающейся оправке	110
3.3.3 Порядок проведения экспериментального волочения	112
3.3.4 Анализ результатов экспериментального волочения	114
3.3.4.1 Влияние профилировки самоустанавливающейся оправки и вязкости смазочного материала на стабильность процесса волочения	114
3.3.4.2 Влияние профилировки самоустанавливающейся оправки и вязкости смазочного материала на силовые параметры процесса волочения	115
3.3.4.3 Влияние профилировки самоустанавливающейся оправки и вязкости смазочного материала на качество труб	118
3.3.4.4 Влияние вязкости смазочного материала на положение оправки в очаге деформации	120
3.4 Определение коэффициента трения скольжения при волочении с использованием современных смазочных материалов	122

3.4.1 Установка и инструмент для физического моделирования	122
3.4.2 Адаптация трибометра для исследования коэффициента трения в процессе волочения	125
3.4.3 Алгоритм трибометрического исследования	126
3.4.4 Анализ результатов исследования	127
3.5 Исследование ресурса смазочного материала с вязкостью 0,1 Па·с	130
3.5.1 Постановка задачи исследования	130
3.5.2 Анализ результатов исследования	131
3.6 Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных величин усилия волочения труб на самоустанавливающейся оправке	132
3.7 Выводы	134
4 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА	137
4.1 Разработка технологических режимов волочения на самоустанавливающейся оправке труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм	137
4.2 Опытно-промышленное волочение труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм из стали марки 10	139
4.3 Анализ результатов опытно-промышленного волочения	141
4.3.1 Анализ режима работы самоустанавливающейся оправки	141
4.3.2 Анализ причин волочения в безоправочном режиме. Разработка нового способа задачи и перемещения самоустанавливающейся оправки в полости трубы	143
4.3.3 Оценка соответствия опытно-промышленной партии труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм требованиям DIN EN 10305–1	145
4.4 Выводы	146
5 РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ С ВНУТРЕННИМ ДИАМЕТРОМ ОТ 6,0 ДО 12,0 ММ	149

5.1 Разработка рациональной конструкции и профилировки самоустанавливающейся оправки	149
5.2 Разработка рациональных режимов волочения труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм на самоустанавливающейся оправке	152
5.3 Разработка технологии изготовления прямолинейных холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм	153
5.4 Разработка технологии изготовления холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм в бунтах	157
5.4.1 Особенности оборудования для реализации бунтового волочения труб	158
5.4.2 Особенности технологии бунтового волочения труб	159
5.5 Технико-экономическая оценка возможных технологий производства труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм	163
5.6 Выводы	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	170
Приложение А (обязательное) Технологический регламент 161-В2-1833-2013 Освоение технологии изготовления прецизионных труб в труболовильном цехе №2 с внутренним диаметром менее 12,0 мм	186
Приложение Б (обязательное) Справка об использовании методики оценки напряженного состояния при оправочном волочении труб	188
Приложение В (обязательное) Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс	189
Приложение Г (обязательное) Рабочие чертежи самоустанавливающихся оправок для изготовления труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм .	190
Приложение Д (обязательное) Акт о выполненной работе по освоению технологии изготовления труб с внутренним диаметром 6,0-12,0 мм	192

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Традиционно производство холоднодеформированных труб рассматривается как отдельная подотрасль трубной промышленности, которая производит наиболее технологически сложную продукцию ответственного назначения. При этом потребность в указанной продукции с развитием приоритетных отраслей машиностроения непрерывно увеличивается.

Аналитический обзор современного рынка потребления холоднодеформированных труб показал, что наиболее перспективным и одновременно проблемным сортаментом являются прецизионные холоднодеформированные трубы с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм из низколегированной углеродистой стали. Трубы указанного сортамента применяются в автомобилестроении и машиностроении. В Российской Федерации основным потребителем этих труб является Волжский автомобильный завод.

Наблюдаемое в последние годы интенсивное развитие отрасли отечественного автомобилестроения определяет непрерывное увеличение потребности в трубной продукции указанного сортамента. На сегодняшний день более 70 % всего объема прецизионных труб с заданным внутренним диаметром производят за рубежом. В условиях современной международной ситуации одной из актуальных задач отечественной промышленности является реализация государственной программы импортозамещения. С этой точки зрения организация производства прецизионных труб малого внутреннего диаметра на базе производственных мощностей отечественных трубных компаний является стратегически важной для экономики России задачей. Следует учитывать также, что увеличение спроса требует решения задач по повышению производительности процессов холодной деформации.

Среди известных процессов холодной деформации труб наиболее широкое распространение получили способы холодной прокатки и волочения. При этом технология изготовления холоднодеформированных труб с заданным внутренним

диаметром включает сочетание указанных способов с осуществлением в качестве заключительной операции процесса волочения на оправке.

Современные тенденции совершенствования способов оправочного волочения реализуются в направлении создания и внедрения новых способов. Для изготовления холоднодеформированных труб специального назначения известны: короткооправочное волочение на качающейся оправке или цилиндро-конической оправке в полуплавающем режиме, длиннооправочное волочение-обкатка, волочение-дорнование, периодическое волочение, волочение-прокатка на самоустанавливающейся оправке и др. Ценный вклад в развитие данных процессов внесли такие отечественные ученые как Ю.Г. Гуляев, А.А. Богатов, Г.С. Гун, Г.Л. Колмогоров, Ю.В. Шадрин-Ревдинский, Г.А. Орлов, за рубежом – И.М. Раушенбах, Э.Л. Креймер, М.В. Кашуба, Y. Kazunari, F. Hiroaki. Указанные способы оправочного волочения позволяют повысить точность труб по внутреннему диаметру и толщине стенки, увеличить степень прямолинейности внутреннего канала, а также качество внутренней и наружной поверхности труб.

Следует отметить, что из всего многообразия возможных способов реализации оправочного волочения и значимости результатов, достигнутых при исследовании данных способов, внедрения в действующую технологию изготовления холоднодеформированных труб нашли немногие. Современная технология производства холоднодеформированных труб с требованиями к внутреннему диаметру на отечественных предприятиях характеризуется использованием на заключительных операциях способа волочения на удерживаемой цилиндро-конической оправке или способа волочения на длинной оправке.

Конкурентоспособность способа волочения на удерживаемой цилиндро-конической оправке не вызывает сомнений при изготовлении труб в сортаменте внутреннего диаметра 14 мм и более. Использование удерживаемой оправки для труб меньших размеров затрудняется ввиду конструктивных особенностей крепления оправки к стержню, ограниченной прочностью самого стержня при уменьшении его сечения и вероятности появления дефекта «кольцеватости» на

внутренней поверхности труб. Данные особенности требуют ограничения скорости волочения и соответственно снижают производительность.

Способ волочения прецизионных труб на длинной оправке используется отечественными производителями для изготовления еще более ограниченного сортамента. Главным образом это капиллярные трубы наружным диаметром менее 3 мм с высокими требованиями к качеству внутренней поверхности. Серьезным фактором, сдерживающим применение процесса волочения на длинной оправке, является необходимость осуществления после волочения трудоемких операций по освобождению трубы от оправки, производительность которых сокращается с увеличением диаметра труб. Известно, что наибольшее число дефектов при волочении на длинной оправке связано с нерациональной калибровкой инструмента и настройкой обкатных устройств. Также весьма трудоемкими являются операции подготовки поверхности длинной оправки к волочению, в том числе тщательная очистка ее от остатков смазки, которые требуют определенной культуры и условия хранения и эксплуатации данных оправок.

Поэтому актуальным для изготовления прецизионных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм является использование способа волочения на самоустанавливающейся оправке.

Эффективность данного процесса в технологии изготовления продукции специального назначения очевидна – степень деформации за проход может достигать 50 % при одновременном повышении качества внутренней поверхности труб. Применение самоустанавливающихся оправок позволяет уменьшить операционное время до 40 % при переходе с одного размера труб на другой, ввиду отсутствия необходимости замены стержней, и тем самым увеличить производительность до 15 %. Приоритетность данного направления совершенствования технологии изготовления прецизионных холоднодеформированных труб обусловлена минимальными затратами на переоснащение существующего производства в направлении максимального использования всего комплекса действующих мощностей.

Однако для проектирования высокопроизводительной технологии изготовления стальных труб в сортаменте внутреннего диаметра от 6,0 до 12,0 мм не корректно использование имеющегося опыта и соответствующей научно-технической информации, полученных при освоении технологии волочения на самоустанавливающейся оправке труб из цветных металлов. Главным образом ввиду различия граничных условий процесса. Во-первых, углеродистая сталь в сравнении с цветными металлами менее пластичная, что необходимо учитывать при проектировании режимов деформации. Состав и свойства применяемых технологических смазочных материалов также отличны, соответственно отличны условия обеспечения равновесия самоустанавливающейся оправки, что необходимо учитывать при выборе параметров профилировки волочильного инструмента. Следует отметить, что рациональное использование высокоэффективных смазочных материалов также является одним из эффективных способов интенсификации производства. Для процессов оправочного волочения труб использование высокоэффективных смазочных материалов определяет скоростной режим, износ инструмента и качество продукции. Также выявлено, что существующие аналитические методики определения напряженного состояния не учитывают реальный характер упрочнения металла в процессе деформации, что может привести к потере производительности при освоении новых маршрутов волочения.

Степень разработанности темы исследования.

Освоение технологии изготовления бесшовных труб волочением на самоустанавливающейся оправке отечественными предприятиями началось на производственных мощностях Первоуральского Новотрубного завода в 1960–1970 гг. Среди первых ученых-исследователей данного процесса следует отметить А.Д. Ландихова, П.И. Орро, И.Л. Перлина, А.В. Анисимова, В.Я. Шапиро, В.В. Швейкина, К.В. Гаген-Торна, М.Б. Биска. На основе их трудов первоначально была освоена технология изготовления прецизионных стальных труб внутренним диаметром от 27,0 до 35,0 мм. В дальнейшем было организовано производство топливопроводных труб и труб для холодильных аппаратов.

Аналогичные производства были освоены на Никопольском Южнотрубном заводе (Украина), и в большей степени получили распространение в таких странах как Германия, США, Япония, Великобритания.

Ввиду перспективности производства длинномерной трубной продукции малых размеров с использованием процесса бунтового волочения широкое распространение способ волочения на самоустанавливающейся оправке получил при изготовлении медных и алюминиевых труб в бунтах. Созданию, исследованию и внедрению данной технологии посвящены работы А.М. Антимонова, В.А. Мошкина, В.И. Бояркина.

Целью работы является интенсификация процесса волочения холоднодеформированных труб на самоустанавливающейся оправке на основе зависимостей, выявленных с помощью комплексного моделирования.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Разработка, численная реализация и последующее исследование инженерной методики расчета энергосиловых параметров при волочении на самоустанавливающейся оправке, усовершенствованной с учетом реального характера упрочнения металла и уточненных граничных условий на контактной поверхности с волокой и оправкой.

2. Экспериментальное исследование сопротивления пластической деформации углеродистой стали марок 35 и 12Х1МФ с уточнением кривых упрочнения.

3. Экспериментальное определение вязкости современных смазочных материалов и коэффициента трения скольжения, обеспечиваемого при их использовании.

4. Экспериментальное исследование процесса волочения на самоустанавливающейся оправке с изучением влияния профилировки технологического инструмента и вязкости смазочного материала на качественные характеристики труб.

5. Разработка рациональной конструкции и профилировки самоустанавливающихся оправок, а также способов осуществления операций установки и перемещения оправки.

6. Разработка и реализация высокопроизводительной технологии волочения стальных труб на самоустанавливающейся оправке, в том числе с заданным внутренним диаметром 12,0 мм и менее.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовали: инженерный метод решения краевой задачи механики сплошной среды с привлечением метода конечных элементов и проекционного метода Бубнова-Галеркина; методы определения механических свойств стали с использованием разрывной машины ССИ MTS Insight 100; методы определения динамической вязкости смазочных материалов с использованием ротационного вискозиметра модели VIS 403; методы определения шероховатости поверхности с использованием профилометра SurfTest SJ-201.

Экспериментальные исследования реализованы в условиях Российского научно-исследовательского института трубной промышленности (ОАО «РосНИТИ», г. Челябинск) на лабораторной установке при использовании модуля с двухвалковой прокатной клетью и волочильного модуля, оборудованного тянущим устройством барабанного типа, а также с использованием лабораторного трибометра, модернизированного для решения поставленных задач.

Научная новизна работы:

1. Получена новая аналитическая зависимость для определения усилия волочения труб на самоустанавливающейся оправке, впервые учитывающая реальный характер изменения сопротивления пластической деформации металла.

2. На основе численного исследования напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке определен диапазон допустимого изменения граничных условий на контактной поверхности с волокой и самоустанавливающейся оправкой. Показано, что при разности углов волоки $\alpha_в$ и оправки $\alpha_{оп}$ от 1° до 3° и отношении между коэффициентами трения на

контактной поверхности с волокой f_e и оправкой f_{on} от 1,0 до 1,3 гарантированно обеспечиваются условия равновесного положения оправки.

3. Уточнены эмпирические зависимости сопротивления пластической деформации трубных сталей марок 35 и 12Х1МФ от степени деформации при холодной обработке металлов давлением, позволяющие проектировать рациональные режимы волочения.

4. Определена взаимосвязь вязкости используемых при волочении современных смазочных материалов и коэффициента трения. Получена новая эмпирическая зависимость изменения коэффициента трения от скорости волочения для смазочного материала с вязкостью 0,1 Па·с, позволяющая определять рациональные скоростные режимы волочения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм решения краевой задачи определения напряженного состояния при оправочном волочении, реализованный в среде Excel и позволяющий в производственных условиях оперативно проводить как инженерный расчет усилия волочения, так и многофакторное численно-аналитическое исследование влияния условий осуществления процесса на напряженное состояние металла. Указанная методика расчета внедрена в рабочий процесс технических служб ПАО «СинТЗ» (г. Каменск-Уральский) и учебный процесс подготовки студентов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ», обучающихся по направлению «Металлургия», специальность «Обработка металлов давлением».

2. Выявлены определяющие признаки унификации самоустанавливающихся оправок. На основе указанных признаков впервые приведена классификация профилеразмеров самоустанавливающихся оправок, рекомендуемых для изготовления стальных прецизионных труб с заданным внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм, удовлетворяющих требованиям как отечественных, так и зарубежных стандартов.

3. Определены резервы повышения производительности процесса волочения не менее чем на 10 % за счет эффективного использования ресурса смазочных материалов.

4. Разработан и запатентован способ волочения труб на самоустанавливающейся оправке, согласно которому операцию задачи и перемещения оправки реализуют способом подачи сжатого воздуха или воздействием генератора импульсной нагрузки. Данное решение позволяет сократить затраты на технологический инструмент, уменьшить трудоемкость операций по подготовке труб к волочению на самоустанавливающейся оправке и увеличить производительность до 10 %.

5. На основе комплексного моделирования процесса волочения на самоустанавливающейся оправке определены рациональная конструкция самоустанавливающейся оправки, рациональные режимы деформации и резервы увеличения эффективности использования ресурса смазочных материалов. Разработана эффективная технология изготовления прямолинейных труб и труб в бунтах, удовлетворяющих требованиям отечественных и зарубежных стандартов, рекомендованная к внедрению на ПАО «СинТЗ» (г. Каменск-Уральский).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель напряженного состояния при волочении на самоустанавливающейся оправке.

2. Результаты экспериментального исследования сопротивления пластической деформации стали марок 35 и 12Х1МФ, динамической вязкости современных смазочных материалов и экспериментального определения коэффициента трения при волочении.

3. Результаты экспериментального исследования и промышленного опробования процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке с использованием современных смазочных материалов.

4. Рациональная профилировка самоустанавливающейся оправки, рациональные режимы деформации, новый способ волочения самоустанавливающейся оправки и особенности усовершенствованной на их основе технологии изготовления холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм.

Степень достоверности результатов исследований. Теоретические и численные исследования, выполненные на основе фундаментальных законов механики сплошной среды, теории подобия и современных численных методов, а также экспериментальные исследования, выполненные с применением поверенных приборов, технических средств и современных методик обработки данных, с достаточной для практики сходимостью свидетельствуют о достоверности полученных в диссертационной работе результатов.

Апробация работы. Основные положения научно-исследовательской работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XX Юбилейная научно-техническая конференция «Трубы-2012. Развитие технологий производства наукоемкой трубной продукции», г. Сочи, 2012 г.; 65-ая научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», г. Челябинск, 2013 г.; X Молодежная научно-техническая конференция Трубной Металлургической Компании, г. Сочи, 2014 г.; XXI Международная научно-практическая конференция «Трубы-2014. Трубная промышленность России. Вектор инноваций», г. Челябинск, 2014 г.; 67-ая научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», г. Челябинск, 2015 г.; XXII Международная научно-практическая конференция «Трубы-2016. Инновации и импортозамещение в трубной промышленности», г. Челябинск, 2016 г.; XII Молодежная научно-техническая конференция Трубной Металлургической Компании, г. Сочи, 2016 г.; II Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», г. Магнитогорск, 2016 г.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Разработано 2 технических решения, на которые получены патенты РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, изложена на 192 страницах машинописного текста, включающего 41 рисунок, 29 таблиц, список использованных источников из 133 наименований отечественных и зарубежных авторов, 5 приложений.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ

В последние десятилетия выполнен достаточно большой объем исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на интенсификацию производства холоднодеформированных труб. Подготовленная таким образом научно-техническая база позволяет осуществлять не только комплексную модернизацию существующего производства, но и создавать новое конкурентоспособное оборудование и высокоэффективные технологии.

1.1 Передовые технологии в производстве холоднодеформированных труб волочением

Среди основных современных направлений повышения эффективности процесса волочения труб следует отметить следующие:

1. Увеличение производительности процесса является одним из актуальных вопросов, решение которого связано с созданием и внедрением новых способов волочения труб и совмещением процессов производства. Главным сдерживающим фактором повышения производительности в процессах волочения является пластичность металлов. Поэтому актуальными являются работы, направленные на корректное определение ресурса пластичности металла применительно к задачам обработки металлов давлением, в частности к процессу волочения труб, с последующим принятием мер по его повышению [1–4].

2. Сокращение расходного коэффициента металла в процессе волочения, обеспечиваемое, в том числе, путем совершенствования процесса забивки головок. С использованием современных пакетов прикладных программ решаются задачи оптимальности формы головок и способов их подготовки [5–8]. В работе [9] приведена зависимость оценки вероятности получения складок на забитом конце трубы, подготовленном на радиально-ковочной машине.

3. Сокращение энергозатрат и продолжительности вспомогательных операций обеспечивается использованием процессов холодной запрессовки или проталкивания переднего конца трубы-заготовки или, согласно разработке зарубежных производителей – беззабивочное волочение, где захват трубы-заготовки осуществляется изнутри [10–14].

4. Применение новых материалов и технологий при изготовлении технологического инструмента, совершенствование их конструкции и оптимизация калибровки [15–18].

5. Совершенствование способов подготовки поверхности металла к волочению: использование электролитических и плазменных способов очистки, газоздушного патентирования, пластифицирующих покрытий и др. [19–22].

Среди известных решений, направленных также на повышение качественных характеристик холоднодеформированных труб, следует отметить приемы уменьшения кривизны труб в процессе волочения. Широкое распространение получило применение различных конструкций проводковой арматуры [23], а также осуществление процесса деформации по регламентированным режимам, например, как в работе [24], что позволяет получить готовое изделие с кривизной близкой к нулю, независимо от кривизны исходной заготовки.

1.2 Анализ процесса оправочного волочения как способа изготовления холоднодеформированных труб с заданным внутренним диаметром

Отсутствие фактического контроля положения самоустанавливающейся оправки в очаге деформации предопределяет необходимость обеспечения условий равновесия сил, действующих на ее конический и цилиндрический участки. Согласно результатам практического освоения на отечественных заводах технологии волочения труб на самоустанавливающейся оправке обеспечение равновесного ее положения труднодостижимо. При этом предлагаемые решения данной задачи реализовывали главным образом в трех направлениях:

- определение рациональной профилировки самоустанавливающейся оправки;
- разработка технологических приемов и технических устройств для установки самоустанавливающейся оправки в очаг деформации;
- улучшение условий трения на контактных поверхностях.

1.2.1 Анализ параметров профилировки самоустанавливающихся оправок известных конструкций

Основными параметрами профилировки самоустанавливающейся оправки являются: угол конусности α_{on} ; длины цилиндрического l_u и конического l_k участков оправки; диаметр бочки оправки D_b . При прочих равных условиях, профилировка самоустанавливающихся оправок предопределяет стабильность процесса деформации, высокую точность и качество внутренней поверхности труб. Вопросу разработки рациональной профилировки самоустанавливающихся оправок и расчету ее основных геометрических параметров посвящено достаточное количество трудов.

Одним из условий достижения равновесного положения самоустанавливающейся оправки является обеспечение определенного отношения между углами конусности оправки и волокна: угол наклона образующей оправки α_{on} должен находиться в пределах между значениями угла трения ρ и угла наклона образующей входного конуса волокна α_g . Разность углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ при этом определяется противоречиво. В работе [25] оптимальным считается значение разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ от 1° до 3° , т.е. когда имеется возможность создания в процессе деформации условий жидкостного трения. При этом, устойчивым процесс волочения будет при угле конусности волокна α_g от 11° до 15° . В работе [26] стабильные условия волочения труб на самоустанавливающейся оправке получены при значениях разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ от 4° до 12° . В работе [10] граничные значения разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ определены по результатам экспериментальных исследований, на основе которых получена зависимость для расчета α_{on} .

В работе [27] показано, что с увеличением разности углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on}$ (при изменении α_{ϵ} от 12° до 20° и α_{on} от 5° до 11°) усилие волочения уменьшается до 20 %. Обусловлено это уменьшением величины упрочнения, в том числе уменьшением разброса величины упрочнения по толщине стенки готовой трубы. Так, при увеличении разности углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on}$ длина очага деформации уменьшается. При этом энергия деформирования поглощается меньшим объемом металла, что приводит к повышению температуры, достаточному для частичного протекания процесса возврата. Последнее, в свою очередь, приводит к некоторому разупрочнению в процессе самой деформации.

Что касается продольных перемещений оправки в очаге деформации, вызывающих колебания усилия волочения, то с увеличением разности углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on}$ величина их увеличивается и достигает максимума при $\alpha_{on} = \rho$. Кроме того, в процессе волочения возможны колебания значений коэффициента трения, что также требует выбирать α_{on} с некоторым увеличением [28].

Длина цилиндрического участка l_{ϵ} самоустанавливающейся оправки, как правило, оказывает незначительное влияние на усилие волочения, что позволяет применять самоустанавливающиеся оправки с одной и той же длиной цилиндрической части при различных параметрах процесса без нарушения его устойчивости. Однако следует учитывать, что с увеличением l_{ϵ} для удержания оправки в равновесии требуется большая контактная поверхность на конусе, что приводит к повышению усилия волочения [25].

Более заметное влияние изменение длины цилиндра l_{ϵ} оправки оказывает на ее осевые перемещения в очаге деформации.

Анализ методик расчета, представленных в работах [9, 26, 27, 29], показал, что в основном l_{ϵ} определяется размерами трубы, коэффициентом трения на контактной поверхности трубы с оправкой, углами конусности оправки и волоки. При этом в работе [26] вводится поправочный коэффициент k , принимающий значения от 1 до 3. Однако условия выбора этого коэффициента не приводятся.

В работе [9] формула определения l_u получена из условия равновесия оправки в очаге деформации, поэтому учитывает такие параметры как главные нормальные напряжения, действующие на цилиндре и конусе оправки соответственно. Подобное выражение получено в работе [29], где l_u определяют с учетом отношения давления, действующего на участке деформации по толщине стенке, к давлению, действующему на границе зоны контакта трубы с цилиндрическими участками оправки и волокни.

Известен также приближенный графический способ определения l_u , предложенный А.Д. Ландиховым [25].

Следует отметить, что в любом случае расчетная длина цилиндра оправки требует корректировки, так как в некоторых случаях она оказывается несколько завышенной [28], а в других наоборот недостаточной [29].

Длину конического участка l_k самоустанавливающейся оправки на практике также выполняют с некоторым запасом – до 3 мм – с целью учета отклонения геометрических размеров заготовки, кривизны трубы, колебаний трубы в процессе волочения и т.д. Если l_k выбрана с запасом, нет необходимости специального определения ее для каждого случая волочения, что является одним из параметров унификации волочильного технологического инструмента [30].

В работе [25] параметром унификации принята разность диаметров бочки D_b и цилиндрического участка оправки d_u . Такой подход позволил авторам сократить количество технологического инструмента при неизменном α_{on} .

Анализ методик расчета, представленных в работах [25–27, 30], показал, что основными определяющими параметрами длины l_k являются размеры трубы и углы конусности оправки и волокни. При этом в работе [26] приведена формула максимально возможной протяженности конического участка, а в работе [27] l_k определяется с учетом коэффициента, учитывающего деформацию стенки трубы на конической части оправки и наличие внеконтактной зоны деформации. При этом авторы рекомендуют принимать его в диапазоне от 0,1 до 0,4, без пояснения условий применимости.

Таким образом, анализ применимости существующих методик расчета параметров профилировки самоустанавливающихся оправок показал необходимость учета ряда значимых факторов, в частности коэффициента трения на контактной поверхности с оправкой и давлений, действующих на рабочие участки оправки. Изменение характера указанных факторов в процессе волочения вносит изменения в равновесное состояние оправки в очаге деформации и тем самым оказывает непосредственное влияние на точность обрабатываемых труб.

1.2.2 Обзор конструкций самоустанавливающихся оправок

В настоящее время известны способы, позволяющие решать задачу улучшения условий втягивания оправки в очаг деформации за счет уточнения ее конструкции. Самым простым в исполнении решением является выполнение рабочего цилиндрического участка оправки с некоторой конусностью, примерно 1° – 2° [29]. Или выполнение с торца рабочего цилиндра самоустанавливающейся оправки дополнительного захватного участка:

- с углом наклона образующей меньше угла трения, как предложено в работе [31];
- с криволинейной образующей согласно решению, представленному в работе [32].

Использование самоустанавливающейся оправки в указанных конструктивных исполнениях обеспечивает ее затягивание в очаг деформации, исключая возможность осуществления безоправочного волочения.

С целью обеспечения устойчивого положения оправки в начальный момент формирования очага деформации в работе [33] самоустанавливающаяся оправка выполнена с переходным участком между рабочими конусом и цилиндром. Выполнение данного переходного участка с обратной конусностью, позволяет исключить выталкивание оправки из очага деформации [34]. В работе [35] переходный участок между рабочими конусом и цилиндром выполнен в виде двух усеченных конусов, что обеспечивает установку оправки в очаге деформации в равновесном положении независимо от возможных изменений условий волочения (условий трения, толщины стенки по длине трубы и др.).

1.2.3 Анализ существующих технологических и технических решений, обеспечивающих равновесное положение самоустанавливающейся оправки

С целью предотвращения выталкивания самоустанавливающейся оправки из очага деформации известны различные способы. В работе [36] в трубную заготовку перед волочением вводят упругую вставку с лысками, а затем самоустанавливающуюся оправку. После этого на трубе формируют забойку и задают ее в волоку. В процессе волочения вставка подпирает оправку и предотвращает выталкивание ее из волоки.

Если в рассмотренном способе введение упорного элемента в трубную заготовку осуществляется с определенным натягом, то в работе [37] с целью упрощения ввода упорного элемента, его вводят через радиальное отверстие в стенке трубы. При этом в качестве упорного элемента используют штифт. В процессе волочения штифт деформируется и срезается как по внутренней, так и по наружной поверхности.

В работе [38] с целью исключения выталкивания оправки из очага деформации в процессе волочения, на ее хвостовике крепятся упругие элементы, свободные концы которых расположены по окружности диаметром, превышающим до 15 % внутренний диаметр трубной заготовки. При введении оправки на контакте упругих элементов с внутренней поверхностью трубной заготовки возникают силы трения, обеспечивающие вовлечение оправки в очаг деформации и ее соосное расположение относительно волоки и трубы, последнее способствует также повышению точности изготавливаемых труб.

В работе [39] стабильное положение оправки в очаге деформации в начале процесса волочения обеспечивается за счет выполнения на конусе и цилиндре оправки винтовых линий. Под действием тянущего усилия трубная заготовка движется в направлении волочения, взаимодействуя с винтовой поверхностью оправки, что приводит к вращению оправки и, обеспечению тем самым, постоянства ее положения относительно волоки.

В работе [40] отмечено, что важным условием устойчивого положения самоустанавливающейся оправки в очаге деформации является соблюдение соосности трубы, волокна и оправки, для чего используют, например волокодержатель с двумя последовательно установленными волокнами.

Рассмотренные способы либо предполагают использование дополнительных элементов по удержанию оправки в очаге деформации, либо осуществление дополнительных операций.

Выполнение упругих элементов на оправке согласно конструкции [38] является затруднительным ввиду малости размеров труб рассматриваемого сортамента. При этом, если решения [36, 38] не ухудшают качества труб, то использование штифта по способу [37] может привести к повреждению как внутренней, так и наружной поверхности трубной заготовки. Поэтому, при реализации процесса волочения труб актуальным к освоению сортамента более реалистичным является использование пыжа, предложенного в способе [36]. Однако учитывая исключение использования стержней, возникает проблема перемещения пыжа в полости трубы до требуемого положения. Использование самоустанавливающейся оправки с винтовыми линиями на рабочих участках является также труднореализуемым при изготовлении оправок из твердосплавных материалов.

Следует иметь в виду, что дополнительные операции, например сверление отверстия в теле трубы, приводят к потере производительности.

Особое внимание при волочении труб на самоустанавливающейся оправке следует уделять операциям ее установки и извлечения. В работе [41] в качестве устройства для установки в очаг деформации самоустанавливающейся оправки используют закрепленную на тележке волочильного стана пробку с фиксатором, введение которой в полость трубы осуществляют со стороны головки трубы. В процессе формирования головки труба на выходе из волокна, воздействуя внутренней поверхностью на рычаги фиксатора оправки, создает условие для свободного выхода пробки с фиксатором из канала оправки. В процессе

волочения устройство для установки самоустанавливающейся оправки, располагаясь внутри головки, перемещается вместе с тележкой.

Предложенный в работе [42] способ волочения труб также предполагает установку оправки в очаге деформации со стороны головки трубы посредством штока. Формирование головки осуществляют после введения в полость трубы оправки со штоком. В качестве фиксатора используют кольцо. Приложение тянущего усилия осуществляют путем захвата губками тележки свободного конца штока. При достижении оправкой требуемого положения относительно волоки фиксатор свободно выходит из соединения с оправкой, перемещаясь далее совместно с тележкой.

Использование вместо стержней рассмотренных устройств, потребует изменения технологического процесса, в частности операции формирования головки труб. Также использование указанных устройств является затруднительным для труб малого внутреннего диаметра, как и выполнение внутреннего отверстия с торца рабочего цилиндра оправки, согласно [42], при изготовлении ее из твердосплавных материалов.

Для осуществления операции извлечения самоустанавливающейся оправки известно также немало способов и устройств. Например, в работе [43] с целью свободного отделения оправки от протянутой трубы на заднем конце заготовки наносят сквозные надрезы, длиной большей длины цилиндрической части оправки. Данный способ увеличивает трудоемкость изготовления труб и требует применения специального оборудования.

С целью уменьшения трудоемкости отделения самоустанавливающейся оправки от протянутой трубы в работе [44] предложена оправка, снабженная подпружиненными выступами, выходящими за габариты оправки. В работе [45] конструкция оправки дополнена гибким стержнем, увеличивающим ее массу. Усложнение конструкции оправки дополнительными элементами при изготовлении труб малого диаметра создает трудности при изготовлении оправки ввиду незначительных размеров, как самой оправки, так и отдельных ее элементов.

1.2.4 Анализ влияния качества поверхности и трибологических параметров смазочного материала на условия трения

Анализ влияния качества поверхности деформируемой трубы показал, что более шероховатая поверхность обрабатываемого изделия обеспечивает лучшую адгезию и улучшает условия волочения [46–48]. Аналогичные выводы были получены в работе [49], посвященной исследованию влияния регуляризации микрогеометрии поверхности волочильного инструмента на технико-экономические показатели волочения. В частности, показан новый способ волочения труб на самоустанавливающейся оправке, упрочненной регулярным микрорельефом, например в виде системы синусоидальных канавок, наличие которого способствует благоприятному истечению смазочного материала.

Использование инструмента из металло- и минералокерамических сплавов с регламентированной степенью чистоты поверхности обеспечивает качественные изменения механизма фрикционного взаимодействия металла и инструмента. В результате чего наблюдается меньшая склонностью к налипанию, что в свою очередь способствует значительному улучшению качества внутренней поверхности труб [50, 51].

Трудности достижения оптимальных условий трения на контактной поверхности трубы с оправкой требуют также исследования характера течения смазочных материалов и условий поступления их в очаг деформации, влияния состава, свойств, количества и других трибологических характеристик смазочных материалов на процесс волочения [52-54].

Что касается характера течения, известно, что по длине очага деформации возможны три эпюры скоростей течения вязкопластического смазочного материала [55]. При этом немаловажное значение имеет величина давления смазочного материала на входе в очаг деформации. Стабильность течения смазочного материала относительно волоки в очаге деформации обеспечивается при равномерном характере давлений вдоль длины пояска волоки [56].

К основному свойству смазочных материалов, определяющему стабильность процесса оправочного волочения, следует отнести вязкость. Повышенная вязкость уменьшает выдавливание смазочного материала из очага деформации в направлении противоположном волочению. Однако, при этом требуется больше времени для нанесения смазочного материала и увеличиваются затраты на трение, что может приводить к нарушению работы оправки. Необходимая вязкость смазочного материала при прочих равных условиях определяется прочностью протягиваемого металла и поперечными размерами трубы. Чем прочнее протягиваемый металл, тем большей должна быть вязкость во избежание интенсивного выдавливания смазочного материала. Чем меньше толщина стенки трубы, тем менее интенсивным становится выдавливание смазочного материала и соответственно вязкость смазочного материала может быть уменьшена [25].

Важную роль играет толщина смазочного слоя. Известно, что в процессе волочения происходит утонение смазочного слоя, поэтому сохранение хотя бы мономолекулярного слоя обеспечит механическое экранирование – разделение контактирующих поверхностей [47, 57]. Увеличению толщины смазочного слоя между контактируемыми поверхностями трубы и самоустанавливающейся оправкой способствует увеличение длин рабочих конусного и цилиндрического участков. Существенное влияние оказывает также зазор между бочкой оправки и трубой и особенно разность углов $\alpha_g - \alpha_{on}$, уменьшение которых улучшает условия гидродинамического режима волочения. В первую очередь эффективность гидродинамического волочения определяется скоростью волочения, вязкостью смазочного материала и профилировкой оправки. При этом известно, что цилиндро-коническая форма самоустанавливающейся оправки позволяет создать в процессе волочения режим гидродинамического трения без использования специальных приспособлений [10, 29, 58].

На станах с прямолинейным движением условия создания гидродинамического режима являются затруднительными, ввиду наличия продолжительной нестационарной стадии волочения, характеризуемой

длительным изменением скорости волочения до заданной. Большие скорости волочения и сравнительно меньшая продолжительность переходного процесса на станах барабанного типа позволяют получить стабильность нагнетания и подачи смазочного материала в очаг деформации [10, 27]. Следует иметь в виду, что при скорости бунтового волочения более 1200 м/мин возможно нарушение условий работы оправки, а именно ее выталкивание из очага деформации в результате значительного увеличения давления смазочного материала.

Среди ряда специальных требований, предъявляемых к используемым в процессе волочения труб смазочным материалам, также следует учитывать степень термической стабильности смазочного материала в процессе трения и возможность диссоциации его в процессе термообработки с образованием газообразной восстановительной среды [50, 59]. В работах [46, 60] рассмотрено влияние влажности применяемых смазочных материалов на способность металлов к волочению. В ходе проведенных исследований выявлено, что в условиях повышенной влажности подсмазочное покрытие труб теряет способность удерживать смазочный материал, что значительно усложняет процесс волочения – способствует увеличению усилия волочения, налипанию металла на волоку, ухудшает качество поверхности трубы.

В работе [61] показана эффективность использования в процессах волочения стеклографитного смазочного материала, который не требует нанесения подсмазочного слоя. С целью повышения качества внутренней поверхности труб в работе [8] процесс оправочного волочения ведут с применением порошкообразного смазочного материала. Все большее применение находят жидкие и водорастворимые смазочные материалы как зарубежного, так и отечественного производства [47, 62–65]. При этом использование реактивных жидких смазочных материалов, не требующих нанесения подсмазочного покрытия, повышает эффективность технологии волочения. Интересен способ, предложенный в работе [66], где роль смазочного материала в процессе волочения выполняет поверхностный слой, создаваемый путем последовательного интенсивного нагрева и охлаждения трубы и характеризующийся особыми пластифицирующими свойствами.

Среди технических решений, направленных на обеспечение требуемых условий трения на контактной поверхности трубы с оправкой, наиболее широкое распространение нашли различные конструкции оправок, снабженные распыляющими соплами и отверстиями для подачи и/или отвода смазочного материала [67, 68], напорными втулками [69, 70], пыжами и ершами на переднем конце оправок, пропитанными смазочным материалом [71] и др. При изготовлении оправочным волочением труб небольшой длины известны случаи использования заглушек на конце трубы-заготовки с заполнением ее полости смазочным материалом [72].

Следует отметить, что в научно-технической литературе трибологические характеристики современных смазочных материалов освещены недостаточно полно, что вызывает определенные трудности при выполнении исследовательских работ, в том числе при инженерных расчетах. Учитывая, что характер изменения коэффициента трения на контактной поверхности трубы с волокой и оправкой определяется давлением смазочного материала, его реологическими свойствами, скоростью относительного перемещения инструмента и металла трубы и др. [73], использование справочных данных 1960-1970 годов о трибологических характеристиках смазочных материалов на основе мыла и графита снижает достоверность результатов. Поэтому корректное определение таких величин как вязкость и коэффициент трения при использовании современных смазочных материалов является актуальной задачей.

1.3 Анализ современного уровня развития теории оправочного волочения

1.3.1 Оценка общего уровня исследований и принимаемых допущений

Современный уровень развития средств теоретического анализа позволяет исследовать различные процессы обработки металлов давлением. Использование при этом системного подхода [74] позволяет создавать технологические модели целых производств [62].

Широкое распространение для решения различного рода задач обработки металлов давлением при математическом моделировании нашел метод конечных элементов (МКЭ). Применение МКЭ, в том числе на основе современных пакетов прикладных программ, для описания процессов оправочного волочения позволило провести следующие исследования:

- изучение процессов теплопередачи [75];
- определение соотношения деформаций при волочении толстостенных и тонкостенных труб [76];
- изучение характера и степени поврежденности металла [77, 78];
- определение оптимальной формы оправки, обеспечивающей минимальную обрывность труб [79];
- решение оптимизационных задач на основе учета электромеханических преобразований энергии на волочильном стане [80] и определение критериев энергоэффективного управления процессом волочения [81] и др.

Ряд работ по математическому моделированию посвящен исследованию показателей качества холоднодеформированных труб [82–84] с различным подходом к описанию системы допущений и используемых для этого методов теоретического анализа. Однако, не смотря на имеющиеся расхождения, большинство из них имеют схожий характер зависимости силовых параметров процесса от угла конусности волоки, коэффициентов вытяжки и трения [85].

Известны модели процесса волочения, основанные на применении энергетического подхода и метода верхней оценки [86, 87], метода линий скольжения [88], генетических алгоритмов [89], а также полученные без привлечения теории пластичности и аппарата тензорного исчисления [90].

Среди основных распространенных упрощений и допущений при анализе напряженного состояния в процессе волочения следует отметить следующие:

- не учитываются сдвиговые деформации на коническом участке инструмента [91], хотя известно, что сдвиговые составляющие оказывают влияние на качество обрабатываемого металла, вызывая неоднородность деформации [92];

- напряжения в калибрующем пояске определяются по аналитическим выражениям, используемым для описания напряжений в рабочей зоне [93];
- не учитывается влияние сил инерции [94], что особенно важно при увеличении скорости волочения;
- не учитывается скоростная неоднородность деформации [95], влияние которой сравнимо с влиянием изменения коэффициента трения на контактной поверхности;
- усредняется сопротивление пластической деформации по очагу деформации [10, 25, 27, 29, 96 и др.], при том, что величина упрочнения определяет ресурс пластичности и соответственно устойчивость процесса волочения. Следует отметить, что известны попытки учета реального характера упрочнения, например, с использованием численного решения уравнения Кармана [97] или с использованием методики определения траектории перемещения частиц в процессе формоизменения [98].

Анализ информации о механических свойствах углеродистых марок стали, ввиду их большей востребованности в доле рассматриваемого сортамента трубной продукции, выявил, что в зависимости от способа аппроксимации экспериментальных данных эмпирические кривые упрочнения определяются зависимостями различного вида. Главным образом экспоненциальными, полиномиальными, линейными и степенными [27, 99, 100]. Данный факт затрудняет их использование при аналитическом моделировании. Также выявлены случаи когда, расчетное по эмпирической зависимости значение не соответствует графическому значению на кривой упрочнения [27]. Кроме того, в научно-технической литературе известны обобщенные эмпирические зависимости изменения механических свойств, например для определенной группы марок стали – углеродистых, легированных и др. [99]. В работе [101] предложена единая зависимость для процесса холодной и горячей деформации. Однако ввиду большого числа приближений и допущений ее использование не рекомендуется.

1.3.2 Анализ существующих математических моделей напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке

Сравнительный анализ существующих аналитических моделей процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке выполнен на основе результатов работ [10, 25, 27, 29, 102–104].

В основе всех анализируемых работ заложен инженерный метод – решение дифференциального уравнения равновесия проекций сил действующих в очаге деформации с привлечением условия пластичности и граничных условий. Применение инженерного метода позволяет учесть характер упрочнения металла при расчете энергосиловых параметров, что является актуальной задачей для процессов холодной деформации, особенно в случае оправочного волочения, так как сопротивление пластической деформации σ_S зависит от степени накопленной деформации.

В рассматриваемых моделях реальный характер деформационного упрочнения в процессе волочения не учитывается.

Во-первых, во всех работах сопротивление пластической деформации представлено средним значением для каждого из рассматриваемых участков очага деформации. В конце каждого участка сопротивление металла пластической деформации определяется степенной эмпирической зависимостью.

Во-вторых, во всех анализируемых работах при выводе математических зависимостей не учитывается приращение сопротивления пластической деформации по длине очага деформации в результате упрочнения.

Стоит также отметить, что в работе [103] сопротивление деформации определено по временному сопротивлению, в остальных – по пределу текучести.

Во всех анализируемых работах описание напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке сводят к плоской задаче путем перехода к цилиндрической системе координат.

В большинстве работ закон трения принимают по Амонтону-Кулону, в работе [103] – по Зибелю. При этом граничные условия на контактных

поверхностях металла трубы с волокой и самоустанавливающейся оправкой в работе [27] заданы равенством коэффициентов трения. Авторы исследования в работе [104] используют приведенный коэффициент трения.

Во всех анализируемых работах, за исключением [102], задача решена при равенстве давлений, действующих на волоку и самоустанавливающуюся оправку.

Как уже было отмечено, дискретизация очага деформации при волочении на самоустанавливающейся оправке на участки может быть различной. На сегодняшний день сложилось два подхода, отличающихся наличием или отсутствием участка безоправочного волочения в зоне перехода конусной части оправки в цилиндрическую. Выделенный в работах В.А. Алешина, В.С. Паршина, В.И. Уральского, В.Я. Шапиро вторичный участок безоправочного волочения в зоне перехода конусной части оправки в цилиндрическую, как отмечают сами авторы, характеризуется весьма малой протяженностью, определяемой в значительной степени механическими свойствами обрабатываемого материала.

В рассмотренных работах наличием данного безоправочного участка пренебрегают, разбивая очаг деформации на четыре основных участка – редуцирования трубы по наружному диаметру; основного обжатия по толщине стенки; дополнительного обжатия по толщине стенки; калибровки трубы по наружному диаметру и толщине стенки. При этом в работах [25, 29] учитывают также влияние внеочаговой упругой деформации, а в работах [27, 102] изменение толщины стенки трубы на участке редуцирования.

Ранее отмечалось, что самоустанавливающаяся оправка может совершать в очаге деформации осевые перемещения в диапазоне между крайним передним и крайним задним ее положениями, изменяя при этом силовые параметры деформации. Обозначим величину этих перемещений l_{zu} и отметим, что в рассматриваемых работах l_{zu} влияет на протяженность участка дополнительного обжатия по толщине стенки $l_{\partial o}$, определяя равновесное положение оправки. Однако, это влияние и понятие равновесия оправки в очаге деформации противоречиво оценивается разными авторами. В работах [103, 104] равновесным называют крайнее переднее положение оправки. При этом в работе [104]

протяженность участка $l_{\partial o}$ принята равной $0,25l_{zu}$. Хотя согласно данным работы [105] протяженность участка $l_{\partial o}$ в крайнем переднем положении близка к нулю. В работе [106] говорится, что условия деформации в крайнем переднем положении являются нехарактерными для реального процесса волочения на самоустанавливающейся оправке. Подобного мнения придерживаются и авторы работ [25, 102] утверждая, что оптимальным является положение оправки, удаленное от крайнего переднего положения. При этом в работе [102] такое положение оправки наблюдается при условии, если $l_{\partial o}$ принимает значения от $0,2l_{zu}$ до $1,0l_{zu}$.

Следует отметить, что в работах [10, 107] равновесное положение самоустанавливающейся оправки в очаге деформации определяют протяженностью контакта внутренней поверхности трубы с рабочим конусом оправки l_{oo} . В работе [108] область устойчивого волочения труб на самоустанавливающейся оправке определяется динамическими характеристиками оборудования.

Однако имеется ряд работ, где энергосиловые параметры процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке заведомо определяются без учета колебаний ее в очаге деформации и соответственно без учета связанных с этим динамических изменений напряжений. Сравнительный анализ на основе численного исследования показывает, что эти допущения некорректны применительно к практическим расчетам [103].

1.4 Выводы и постановка задач исследования

Анализ процесса оправочного волочения труб, как способа изготовления холоднодеформированных труб специального назначения, в том числе с заданным внутренним диаметром, позволил сделать следующие выводы:

1. К настоящему времени проведено большое количество исследований, направленных на повышение эффективности процессов оправочного волочения

труб, что позволяет оставаться способам волочения на удерживаемой цилиндрической и длинной оправках конкурентоспособными в технологии изготовления труб внутренним диаметром более 14 мм и менее 3 мм соответственно.

2. Наиболее рациональным с точки зрения минимизации затрат на освоение производства стальных прецизионных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм является использование на заключительных этапах деформации способа волочения на самоустанавливающейся оправке. Данный процесс без особых конструктивных изменений интегрируется в действующее трубоволочильное производство с цепными волочильными станами и позволяет увеличить производительность до 15 % в сравнении с волочением на удерживаемой оправке. Эффективность использования данного способа волочения обоснована многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями преимущественно в сортаменте труб из цветных металлов. Волочение с использованием самоустанавливающейся оправки в сравнении с другими способами оправочного волочения позволяет в большей мере устранить разностенность исходной заготовки, сократить интенсивность увеличения глубины дефектов и степень структурной разнонаправленности металла, остаточных напряжений, что в комплексе позволит повысить точность внутреннего диаметра и получить качественную внутреннюю поверхность трубы.

3. Анализ методик определения параметров профилировки самоустанавливающейся оправки показал, что в большей степени расхождения значений наблюдаются для длин цилиндрического и конического участков оправки. При прочих равных условиях, максимальные и минимальные значения длин, рассчитанных по рассмотренным методикам, отличаются в 2,6 раза. Данный факт свидетельствует об ограниченной применимости той или иной методики и необходимости разработки универсального подхода с уточнением на основе анализа геометрии очага деформации формул расчета длин цилиндрического и конического участков самоустанавливающейся оправки.

4. Сравнительный обзор применяемых конструкций самоустанавливающейся оправки показал их ограниченность для изготовления труб малого внутреннего диаметра, так как наличие более одного конического элемента увеличивает трудоемкость его исполнения на оправке малых размеров, особенно в случае изготовления ее из твердосплавного материала. Предварительная проработка вопроса изготовления оправок рассматриваемых конструкций подтвердила отсутствие у потенциальных поставщиков данной технической возможности. Таким образом, для обозначенного сортамента труб целесообразным является использование оправки в конструктивном исполнении, основными элементами которого являются передняя фаска, рабочий цилиндрический участок, рабочий конический участок, бочка. Рабочий цилиндрический участок при этом выполняется с конусностью от 1° до 2° .

5. Использование известных приемов и устройств для установки и извлечения самоустанавливающейся оправки при реализации технологии изготовления труб малого внутреннего диаметра также является невозможным. С одной стороны данные устройства исключают недостатки и трудности, имеющие место при работе со стержнями в случае волочения на удерживаемой оправке, с другой – создают ряд проблем, решение которых потребует существенных затрат с потерей производительности. Поэтому для освоения рассматриваемого сортамента труб актуальным является решение задачи по введению, перемещению и установке оправки.

6. Учитывая важную роль смазочного материала в процессе волочения на самоустанавливающейся оправке обязательным условием является определение его трибологических характеристик с последующим анализом их влияния на силовые параметры и стабильность процесса волочения. В научной литературе имеется достаточно справочной информации о трибологических параметрах смазочных материалов на основе мыла и графита, на смену которым в настоящее время приходят более эффективные современные смазочные материалы. Для современных смазочных материалов подобная информация отсутствует, поэтому актуальной является задача исследования вязкости и коэффициента трения, как

параметров наиболее значимых для процесса волочения на самоустанавливающейся оправке.

7. Существующие аналитические модели определения напряженного состояния при волочении на самоустанавливающейся оправке не позволяют с достаточной точностью получить требуемую информацию о распределении по длине очага деформации давлений, действующих на технологический инструмент, главным образом по следующим причинам: пренебрежение реальным характером упрочнения металла, допущение равенства давлений на волоку и оправку, использование неактуальной справочной информации о величине коэффициента трения. При реализации новых маршрутов указанные допущения приводят к увеличению обрывности труб и соответственно снижению производительности процесса волочения. В связи с этим, вопрос разработки более корректной инженерной методики расчета напряженного состояния при волочении на самоустанавливающейся оправке остается актуальным.

8. Различие существующей справочной информации о характере упрочнения углеродистых марок стали, требует проведения дополнительных исследований по уточнению их сопротивления пластической деформации.

Таким образом, целью диссертационной работы является интенсификация процесса волочения холоднодеформированных труб на самоустанавливающейся оправке на основе зависимостей, выявленных с помощью комплексного моделирования.

Достижение поставленной цели требует реализации комплекса экспериментально-теоретических исследований и опытных работ, обеспечивающих решение следующих задач:

1. Разработка, численная реализация и последующее исследование инженерной методики расчета энергосиловых параметров при волочении на самоустанавливающейся оправке, усовершенствованной с учетом реального характера упрочнения металла и уточненных граничных условий на контактной поверхности с волокой и оправкой.

2. Экспериментальное исследование сопротивления пластической деформации углеродистой стали марок 35 и 12Х1МФ с уточнением кривых упрочнения.

3. Экспериментальное определение вязкости современных смазочных материалов и коэффициента трения скольжения, обеспечиваемого при их использовании.

4. Экспериментальное исследование процесса волочения на самоустанавливающейся оправке с изучением влияния профилировки технологического инструмента и вязкости смазочного материала на качественные характеристики труб.

5. Разработка рациональной конструкции и профилировки самоустанавливающихся оправок, а также способов осуществления операций установки и перемещения оправки.

6. Разработка и реализация высокопроизводительной технологии волочения стальных труб на самоустанавливающейся оправке, в том числе с заданным внутренним диаметром 12,0 мм и менее.

2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ВОЛОКА – ОПРАВКА – ОЧАГ ДЕФОРМАЦИИ» ДЛЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ НА САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕЙСЯ ОПРАВКЕ

2.1 Предварительный анализ и построение концептуальной схемы моделируемой системы

Задачей математического моделирования является определение напряженного состояния металла трубы в процессе волочения на самоустанавливающейся оправке с учетом изменения сопротивления пластической деформации металла трубы по длине очага деформации в результате его упрочнения.

Объектом математического моделирования является система «волока – оправка – очаг деформации», принципиальная схема которой приведена на рисунке 2.1, где R_3, r_3, S_3 – наружный и внутренний радиусы и толщина стенки трубной заготовки соответственно; R_m, r_m, S_m – наружный и внутренний радиусы и толщина стенки трубы соответственно; $l_p, l_{oo}, l_{до}, l_{кд}$ – длины участков редуцирования по наружному диаметру, основного и дополнительного обжатия по толщине стенки, калибровки по наружному и внутреннему диаметрам соответственно; L – длина очага деформации; α_g – угол наклона образующей конусного участка волоки; α_{on}, β_{on} – углы наклона образующих конусного и цилиндрического участков самоустанавливающейся оправки соответственно; α_{ent} – угол наклона образующей внутренней поверхности трубы на участке редуцирования; l_k, l_y – длины конусного и цилиндрического участков самоустанавливающейся оправки; R_b, r_y – радиусы бочки и цилиндрического участка самоустанавливающейся оправки соответственно; $r_{к1}$ – радиус в точке начала контакта внутренней поверхности трубы с оправкой.

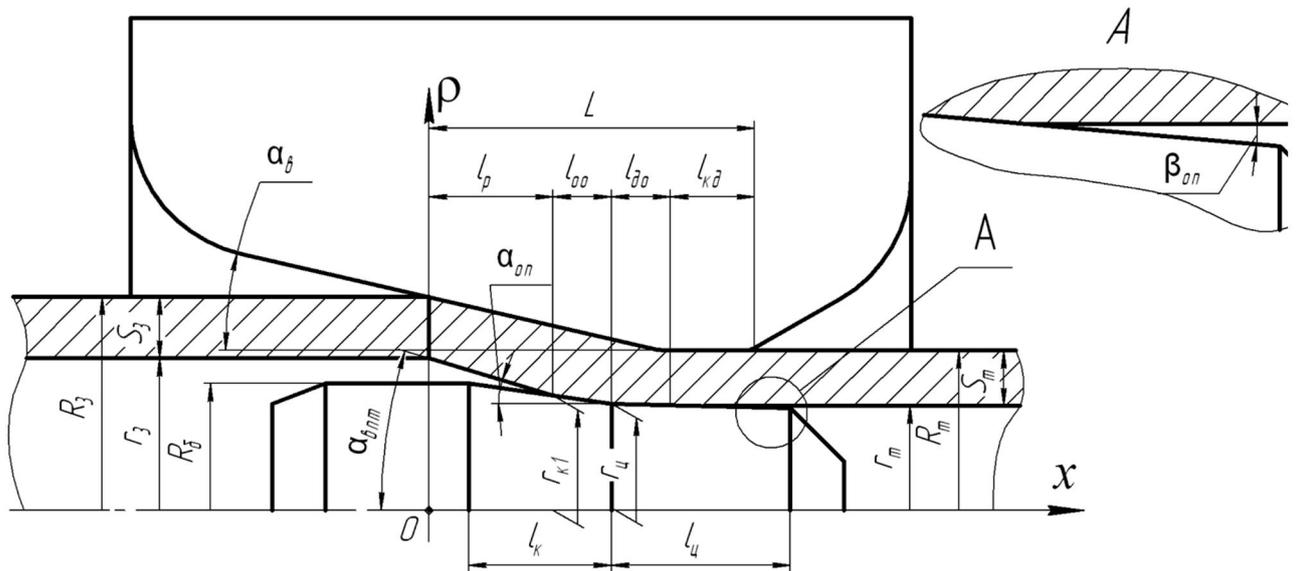


Рисунок 2.1 – Схема системы «волокна – оправка – очаг деформации»

На основе сложившихся подходов решения краевых задач в практике обработки металлов давлением и применительно к рассматриваемой системе и условиям ее функционирования сформулирована следующая система допущений и упрощений:

1. Система «волокна – оправка – очаг деформации» рассматривалась в цилиндрической системе координат, что позволило свести задачу к плоской и представить процесс волочения труб на самоустанавливающейся оправке как волочение полосы между двумя неподвижными плитами с профилем, соответствующим профилировке волокна и самоустанавливающейся оправки.

2. Принималось, что деформируемый металл несжимаем, т.е. выполняется условие:

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} = 0,$$

где ξ_{xx} , ξ_{yy} , ξ_{zz} – скорости деформации в направлении координатных осей x , y , z соответственно.

3. Принималось, что деформируемый металл идеально пластичный.

4. Принималось, что сопротивление металла пластической деформации σ_S , Н/мм², определяется согласно следующей зависимости [102]:

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + a (\varepsilon)^b, \quad (2.1)$$

где σ_{s0} – сопротивление металла пластической деформации в исходном (недеформированном) состоянии, Н/мм²;

ε – степень пластической деформации, %;

a, b – реологические коэффициенты, определяющие интенсивность изменения сопротивления металла пластической деформации.

5. Принималось, что на контактной поверхности трубы с инструментом коэффициент трения f не изменяется, т.е. $f = \text{const}$, при этом допускалось различие между коэффициентом трения на контактной поверхности трубы с волокой f_e и коэффициентом трения на контактной поверхности трубы с оправкой f_{on} .

Граничные условия на контактной поверхности задавались согласно закону Амонтона-Кулона. При этом граничные условия на контактной поверхности:

- с волокой определялись следующей формулой:

$$\tau_e = f_e P_e; \quad (2.2)$$

- с самоустанавливающейся оправкой определялись следующей формулой:

$$\tau_{on} = f_{on} P_{on}. \quad (2.3)$$

6. Принималось, что технологический инструмент (волока и самоустанавливающаяся оправка) – абсолютно жесткие тела, т.е. в процессе деформации технологический инструмент не подвергается упругому сплющиванию.

7. Трение в элементах механической трансмиссии волочильного стана не учитывалось. Также принималось, что динамические скачки во время работы стана отсутствуют, т.е. система жесткая.

8. При дискретизации очага деформации выделялись четыре значимые зоны, пренебрегая наличием участка вторичного безоправочного волочения.

9. Не учитывалось влияние внеконтактной деформации на входе / выходе в очаг деформации.

10. Изменение толщины стенки трубы ΔS , мм, на участке редуцирования определялось по эмпирической формуле Шевакина-Чернавского-Ламина [27]:

$$\Delta S = \frac{1}{6} \left(\frac{2R_3 - 2R_p}{2R_3 - S_3} \right) \left(3 - 10 \left(\frac{S_3}{2R_3} \right)^2 - 13 \frac{S_3}{2R_3} \right), \quad (2.4)$$

где R_3 , R_p – наружный диаметр трубы на входе в очаг деформации и в конце участка редуцирования, мм.

11. Координаты точки начала контакта внутренней поверхности трубы с оправкой определялись из условия пересечения образующих внутренней поверхности трубы и конуса оправки.

12. Задача рассматривалась в статическом состоянии, т.е. при условии, что оправка находится в равновесии. При этом положение оправки в очаге деформации задавалось протяженностью участка дополнительного обжатия по толщине стенки $l_{\partial o}$, поскольку последний сопряжен с началом калибрующего участка, что позволит более точно отследить положение оправки относительно неподвижной волоки.

На основе сравнительного анализа принятой геометрии очага деформации и предлагаемых в работах [10, 25, 27, 105] подходов в определении крайних положений самоустанавливающейся оправки, были уточнены геометрические условия задания равновесного положения оправки. Протяженность участка дополнительного обжатия по толщине стенки $l_{\partial o}$, мм, с учетом возможных осевых перемещений самоустанавливающейся оправки l_{zu} [25] и при условии изменения толщины стенки на участке редуцирования, определялась по следующей формуле:

$$l_{\partial o} = (S_m + R_{ce}) \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{on}}{2} \right) + k \left(\frac{(S_3 + R_{ce}) \cos \left(\frac{\alpha_{on}}{2} \right) - (S_p + R_{ce}) \cos \left(\alpha_\theta - \frac{\alpha_{on}}{2} \right)}{\sin \alpha_\theta \cos \left(\frac{\alpha_{on}}{2} \right)} \right), \quad (2.5)$$

где R_{ce} – радиус скругления границы сопряжения конусного и калибрующего участков волоки, мм;

k – коэффициент положения оправки, изменяющийся от 0,2 до 0,8 и определяющий ее равновесное положение.

При этом значение коэффициента k и соответственно положение оправки в установившемся режиме волочения определялось на этапе экспериментального исследования.

Таким образом, с учетом принятых допущений, структура моделируемой системы «волока – оправка – очаг деформации» представлена в виде концептуальной схемы, определяющей свойства элементов анализируемой системы и их взаимосвязь (Рисунок 2.2).

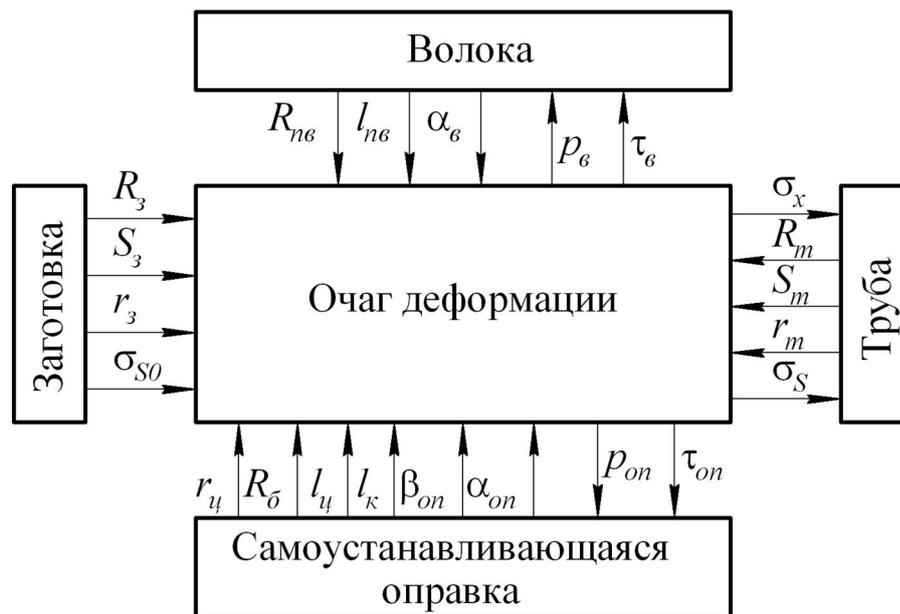


Рисунок 2.2 – Концептуальная схема моделируемой системы «волока – оправка – очаг деформации»

Согласно концептуальной схеме, определяющими параметрами рассматриваемой системы, оказывающими влияние на условия осуществления процесса оправочного волочения, являются следующие:

- размеры поперечного сечения заготовки – R_3 , r_3 , S_3 и готовой трубы – R_m , r_m , S_m ;
- параметры профилировки технологического инструмента: волока – R_{nv} , l_{nv} , α_v и самоустанавливающаяся оправка – R_b , r_u , l_k , l_u , α_{on} , β_{on} ;
- сопротивление металла пластической деформации в исходном состоянии σ_{S0} .

Параметрами отклика согласно концептуальной схеме рассматриваемой системы являются сопротивление металла пластической деформации σ_S и силовые параметры процесса – контактные давления и касательные напряжения со стороны волокна p_ϵ , τ_ϵ и самоустанавливающейся оправки p_{on} , τ_{on} , определяющие в свою очередь продольное напряжение – напряжение волочения σ_x .

Кроме того, согласно условиям осуществления процесса волочения, напряжение волочения σ_x должно быть меньше истинного значения предела текучести металла σ_m или сопротивления деформации σ_S на некоторую величину, называемую коэффициентом запаса прочности K_3 . В практике труболовочильного производства коэффициент K_3 принимают равным от 1,35 до 1,60 в зависимости от отношения S/D [105].

2.2 Анализ параметров формоизменения трубы по длине очага деформации

Очаг деформации рассматриваемой системы, образован волокой, самоустанавливающейся оправкой и деформируемой трубой.

В практике трубного производства используют стандартизированные волокна из сплава марки ВК8. При этом угол наклона образующей конического участка α_ϵ волокна составляет от 9° до 15° ; радиус $R_{n\epsilon}$ соответствует наружному диаметру готовых труб; протяженность калибрующего участка $l_{n\epsilon}$ (пояска) выбирают в зависимости от назначения изготавливаемых труб: для прецизионных – с увеличенной длиной калибрующего пояска.

Основными геометрическими параметрами самоустанавливающейся оправки, определяющими стабильность процесса волочения и соответственно точность обрабатываемых труб, являются: угол наклона образующей рабочего конического участка оправки α_{on} , длины рабочих цилиндрического l_u и конического l_k участков оправки; радиус бочки оправки R_ϵ . Согласно результатам анализа существующих профилировок самоустанавливающихся оправок (п.1.4) для улучшения условий схода трубы с оправки рабочий цилиндрический участок

целесообразно выполнять с небольшой конусностью. Поэтому угол β_{on} принимался равным от 1° до 2° .

Определение параметров формоизменения деформируемой трубы – наружного и внутреннего диаметров, толщины стенки и площадей контактных поверхностей трубы с инструментом – выполнялось для каждого из выделенных участков очага деформации. При этом принималось, что в установившемся процессе волочения оправка располагается относительно калибрующего пояска волокна на расстоянии l_{do} , определяемом по формуле (2.5).

Анализ параметров формоизменения трубы проводился по ходу процесса волочения: от участка редуцирования к участку калибровки.

2.2.1 Параметры формоизменения на участке редуцирования

Параметры формоизменения на участке редуцирования с соответствующими обозначениями приведены на рисунке 2.3, а. Внутренний диаметр трубы уменьшается от диаметра заготовки $2r_3$ до диаметра $2r_p$, равного диаметру конуса оправки $2r_{к1}$ в точке начала контакта внутренней поверхности трубы с оправкой. Наружный диаметр деформируемой трубы уменьшается от диаметра заготовки $2R_3$ до диаметра $2R_p$.

Толщина стенки трубы S_{p1} определялась согласно формуле (2.4), полагая, что процесс редуцирования осуществляется до наружного диаметра $2R_{nb}$ (случай безоправочного волочения), тогда:

$$S_{p1} = S_3 + \frac{1}{6} \left(\frac{2R_3 - 2R_{nb}}{2R_3 - S_3} \right) \left(3 - 10 \left(\frac{S_3}{2R_3} \right)^2 - 13 \frac{S_3}{2R_3} \right). \quad (2.6)$$

Радиусы $r_{к1}$ и R_p определялись из условия пересечения образующих внутренней поверхности трубы и конуса оправки, согласно схеме на рисунке 2.4.

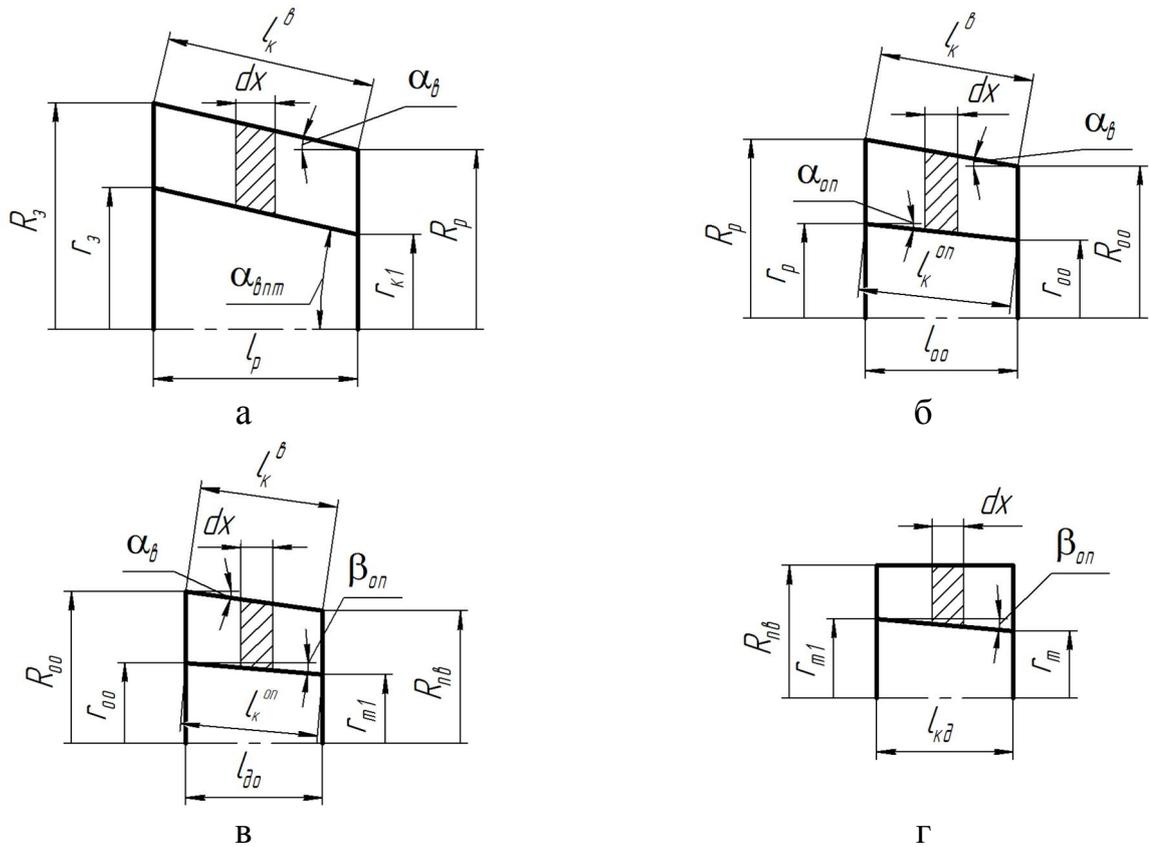


Рисунок 2.3 – Параметры формоизменения трубы в очаге деформации при волочении на самоустанавливающейся оправке на участке: а – редуцирования; б – основного обжатия по толщине стенки; в – дополнительного обжатия по толщине стенки; г – калибровки по наружному и внутреннему диаметрам

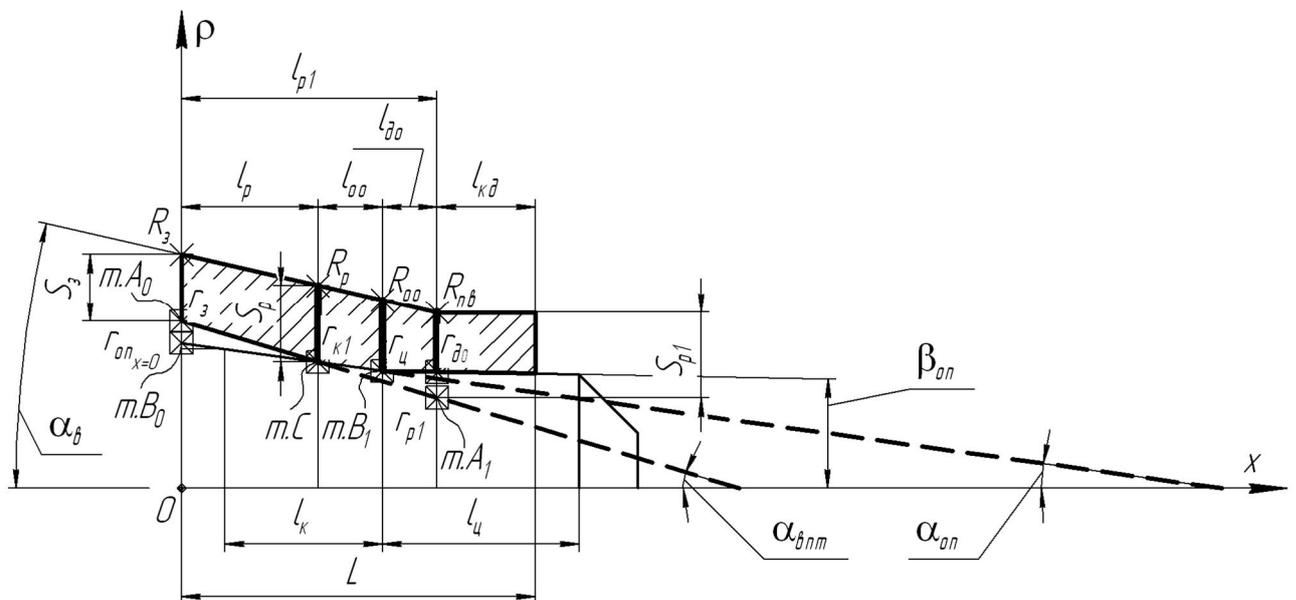


Рисунок 2.4 – Расчетная схема к определению начала контакта внутренней поверхности трубы с конусным участком оправки

Радиус r_{p1} определялся по следующей формуле:

$$r_{p1} = R_{нв} - S_{p1}. \quad (2.7)$$

Тогда протяженность участка редуцирования до значения наружного диаметра $2R_{нв}$ определялась по следующей формуле:

$$l_{p1} = \frac{R_3 - R_{нв}}{\operatorname{tg} \alpha_6}. \quad (2.8)$$

Таким образом, координаты точки A_1 принимались следующими: $x_{A1} = l_{p1}$; $\rho_{A1} = r_{p1}$. Учитывая, что координаты точки A_0 : ($x_{A0} = 0$; $\rho_{A0} = r_3$) – известны, уравнение образующей внутренней поверхности трубы на участке редуцирования представлялось в следующем виде:

$$\frac{x - x_{A0}}{x_{A1} - x_{A0}} = \frac{\rho - \rho_{A0}}{\rho_{A1} - \rho_{A0}},$$

или

$$\rho = \rho_{A1} - \left(\frac{\rho_{A1} - \rho_{A0}}{x_{A1} - x_{A0}} \right) x = r_3 - \operatorname{tg} \alpha_{внт} x, \quad (2.9)$$

где $\operatorname{tg} \alpha_{внт} = \frac{r_3 - r_{p1}}{l_{p1}}$ – тангенс угла наклона образующей внутренней поверхности

трубы на участке редуцирования.

Образующая конуса оправки проходит через точки B_0 и B_1 , координаты которых соответственно: точка B_0 ($x_{B0} = 0$; $\rho_{B0} = r_{on_{x=0}}$); точка B_1 ($x_{B1} = l_{p1} - l_{до}$; $\rho_{B1} = r_u$). Координата $\rho_{B0} = r_{on_{x=0}}$ определялась по следующей формуле:

$$r_{on_{x=0}} = r_u + (l_{p1} - l_{до}) \operatorname{tg} \alpha_{он}. \quad (2.10)$$

Тогда уравнение образующей конуса оправки представлялось в следующем виде:

$$\frac{x - x_{B0}}{x_{B1} - x_{B0}} = \frac{\rho - \rho_{B0}}{\rho_{B1} - \rho_{B0}},$$

или

$$\rho = r_{on_{x=0}} - \operatorname{tg} \alpha_{он} x = r_u + \operatorname{tg} \alpha_{он} (l_{p1} - l_{до} - x). \quad (2.11)$$

Координаты точки начала контакта внутренней поверхности трубы с конусом оправки (точка С), определялись путем решения системы из уравнений (2.9) и (2.11):

$$\begin{cases} \rho = r_3 - \operatorname{tg} \alpha_{\text{внм}} x; \\ \rho = r_4 + \operatorname{tg} \alpha_{\text{он}} (l_{p1} - l_{\text{до}} - x). \end{cases} \quad (2.12)$$

Таким образом, имеем:

$$x_C = l_p = \frac{r_3 - r_4 - (l_{p1} - l_{\text{до}}) \operatorname{tg} \alpha_{\text{он}}}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{внм}} - \operatorname{tg} \alpha_{\text{он}}}; \quad (2.13)$$

$$\rho_C = r_{\text{к1}} = \frac{r_4 \operatorname{tg} \alpha_{\text{внм}} + (l_{p1} - l_{\text{до}}) \operatorname{tg} \alpha_{\text{внм}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{он}} - r_3 \operatorname{tg} \alpha_{\text{он}}}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{внм}} - \operatorname{tg} \alpha_{\text{он}}}. \quad (2.14)$$

Радиус R_p в конце участка редуцирования определялся по следующей формуле:

$$R_p = R_3 - (r_3 - r_{\text{к1}}) \frac{\operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{внм}}}. \quad (2.15)$$

Площади поперечного сечения трубы в начале F_0^p и в конце F_1^p участка редуцирования определялись по следующим формулам:

$$F_0^p = \pi (R_3^2 - r_3^2); \quad (2.16)$$

$$F_1^p = \pi (R_p^2 - r_{\text{к1}}^2). \quad (2.17)$$

Площадь контактной поверхности трубы с волокой $F_{\text{к}}^6$ на участке редуцирования определялась по следующей формуле:

$$F_{\text{к}}^6 = \pi (R_p + R_3) l_{\text{к}}^6 = \pi (R_p + R_3) \frac{l_p}{\cos \alpha_{\text{в}}}. \quad (2.18)$$

2.2.2 Параметры формоизменения на участке основного обжатия

Параметры формоизменения на участке основного обжатия по толщине стенки с соответствующими обозначениями приведены на рисунке 2.3, б. Внутренний диаметр трубы уменьшается от диаметра $2r_{\text{к1}}$ до диаметра $2r_{\text{но}}$,

равного диаметру рабочего цилиндрического участка оправки $2r_u$. Наружный диаметр деформируемой трубы уменьшается от диаметра $2R_p$ до диаметра $2R_{no}$.

Протяженность участка основного обжатия по толщине стенки определялась по следующей формуле:

$$l_{no} = l_{p1} - l_p - l_{\partial o}. \quad (2.19)$$

Тогда радиус R_{oo} в конце участка основного обжатия определялся по следующей формуле:

$$R_{oo} = R_p - l_{oo} \operatorname{tg} \alpha_{\varepsilon}. \quad (2.20)$$

Толщина стенки S_{oo} в конце участка предварительного обжатия определялась по следующей формуле:

$$S_{oo} = R_{oo} - r_u. \quad (2.21)$$

Площади поперечного сечения трубы в начале F_0^{oo} и в конце F_1^{oo} участка основного обжатия по толщине стенки определялись по следующим формулам:

$$F_0^{oo} = F_1^p = \pi (R_p^2 - r_p^2); \quad (2.22)$$

$$F_1^{oo} = \pi (R_{oo}^2 - r_u^2). \quad (2.23)$$

Площади контактных поверхностей трубы с волокой F_{κ}^{ε} и самоустанавливающейся оправкой F_{κ}^{on} на участке основного обжатия определялись по следующим формулам соответственно:

$$F_{\kappa}^{\varepsilon} = \pi (R_{oo} + R_p) l_{\kappa}^{\varepsilon} = \pi (R_{oo} + R_p) \frac{l_{oo}}{\cos \alpha_{\varepsilon}}; \quad (2.24)$$

$$F_{\kappa}^{on} = \pi (r_u + r_{\kappa 1}) l_{\kappa}^{on} = \pi (r_u + r_{\kappa 1}) \frac{l_{oo}}{\cos \alpha_{on}}. \quad (2.25)$$

2.2.3 Параметры формоизменения на участке дополнительного обжатия

Параметры формоизменения на участке дополнительного обжатия по толщине стенки с соответствующими обозначениями приведены на рисунке 2.3, в.

Учитывая, что протяженность рассматриваемого участка очага деформации $l_{\partial o}$ определяется по формуле (2.5), внутренний диаметр трубы уменьшается от диаметра $2r_{\psi}$ до диаметра $2r_{\partial o}$, который определялся по следующей формуле:

$$2r_{\partial o} = 2r_{\psi} - 2l_{\partial o} \operatorname{tg} \beta_{on}. \quad (2.26)$$

Наружный диаметр деформируемой трубы уменьшается от диаметра $2R_{oo}$ до диаметра $2R_{ne}$, равного диаметру пояска волокна.

Толщина стенки S_{oo} уменьшается до толщины стенки $S_{\partial o}$, которая определялась по следующей формуле:

$$S_{\partial o} = R_{ne} - r_{\psi} + l_{\partial o} \operatorname{tg} \beta_{on}. \quad (2.27)$$

Площади поперечного сечения трубы в начале $F_0^{\partial o}$ и в конце $F_1^{\partial o}$ участка дополнительного обжатия определялись по следующим формулам:

$$F_0^{\partial o} = F_1^{oo} = \pi (R_{oo}^2 - r_{\psi}^2); \quad (2.28)$$

$$F_1^{\partial o} = \pi (R_{ne}^2 - r_{\partial o}^2). \quad (2.29)$$

Площади контактных поверхностей трубы с волокой F_{κ}^{ϵ} и самоустанавливающейся оправкой F_{κ}^{on} на участке дополнительного обжатия определялись по следующим формулам соответственно:

$$F_{\kappa}^{\epsilon} = \pi (R_{ne} + R_{oo}) l_{\kappa}^{\epsilon} = \pi (R_{ne} + R_{oo}) \frac{l_{\partial o}}{\cos \alpha_{\epsilon}}; \quad (2.30)$$

$$F_{\kappa}^{on} = \pi (r_{\partial o} + r_{\psi}) l_{\kappa}^{on} = \pi (r_{\partial o} + r_{\psi}) \frac{l_{\partial o}}{\cos \beta_{on}}. \quad (2.31)$$

2.2.4 Параметры формоизменения на участке калибровки

Параметры формоизменения на участке калибровки с соответствующими обозначениями приведены на рисунке 2.3, г. Внутренний диаметр трубы уменьшается от диаметра $2r_{\partial o}$ до диаметра готовой трубы $2r_m$, который определялся по следующей формуле:

$$2r_m = 2r_{\partial o} - 2l_{\kappa\partial} \operatorname{tg} \beta_{on}. \quad (2.32)$$

Наружный диаметр готовой трубы $2R_m$ определялся диаметром калибрующего пояска волокна $2R_{nv}$.

Толщина стенки трубы в конце участка калибровки – толщина стенки готовой трубы, определялась по следующей формуле:

$$S_m = R_{nv} - r_m. \quad (2.33)$$

Протяженность рассматриваемого участка очага деформации определялась длиной калибрующего пояска волокна $l_{\kappa\partial} = l_{nv}$.

Площади поперечного сечения трубы в начале $F_0^{\kappa\partial}$ и в конце $F_1^{\kappa\partial}$ участка калибровки определялись по следующим формулам:

$$F_0^{\kappa\partial} = F_1^{\partial o} = \pi (R_{nv}^2 - r_{\partial o}^2); \quad (2.34)$$

$$F_1^{\kappa\partial} = \pi (R_{nv}^2 - r_m^2). \quad (2.35)$$

Площади контактных поверхностей трубы с волоком F_{κ}^{ϵ} и самоустанавливающейся оправкой F_{κ}^{on} на калибрующем участке определялись по следующим формулам соответственно:

$$F_{\kappa}^{\epsilon} = 2 \pi R_{nv} l_{\kappa\partial}; \quad (2.36)$$

$$F_{\kappa}^{on} = \pi (r_{\partial o} + r_m) \frac{l_{\kappa\partial}}{\cos \beta_{on}}. \quad (2.37)$$

2.3 Применение инженерного метода для описания напряженного состояния системы «волокна – оправка – очаг деформации»

Аналитическое исследование напряженного состояния в процессе волочения труб на самоустанавливающейся оправке согласно инженерному методу проводилось по следующему алгоритму [109]:

- в каждом из рассматриваемых участков очага деформации выделялся кольцевой элемент протяженностью dx ;

- приводилась схема действия сил, приложенных к каждому из выделенных кольцевых элементов;
- для каждого из рассматриваемых кольцевых элементов составлялась система уравнений, включающая условие пластичности и уравнения равновесия проекций сил на оси x и ρ .

Учитывая, что для способа волочения на самоустанавливающейся оправке наибольший интерес представляют параметры напряженного состояния, характеризующие условия процесса именно на контактных поверхностях деформируемой трубы с самоустанавливающейся оправкой, принималось, что изменение напряжения волочения на участке редуцирования незначительно и им можно пренебречь. В теории обработки металлов давлением данный подход известен и применим, так как не вносит значительной погрешности в конечный результат.

2.3.1 Анализ схемы сил, приложенных к участку основного обжатия

Схема сил, приложенных к кольцевому элементу протяженностью dx , выделенному на участке основного обжатия трубы по толщине стенки приведена на рисунке 2.5.

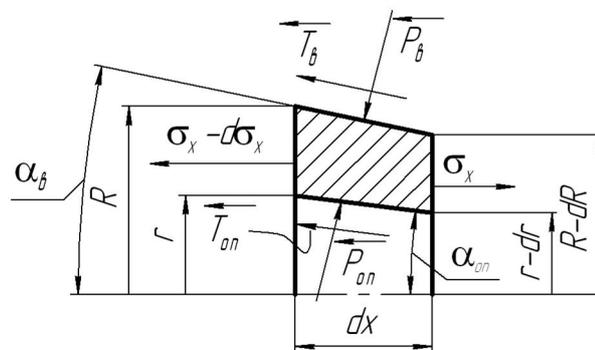


Рисунок 2.5 – Схема сил, приложенных к кольцевому элементу, выделенному на участке основного обжатия трубы по толщине стенки

Уравнения равновесия проекции сил на оси x и ρ будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \sum x: P_\epsilon \sin \alpha_\epsilon + T_\epsilon \cos \alpha_\epsilon - P_{on} \sin \alpha_{on} + T_{on} \cos \alpha_{on} - \sigma_x F_1^{oo} + \\ + \sigma_x F_0^{oo} - d\sigma_x F_0^{oo} = 0; \\ \sum \rho: -P_\epsilon \cos \alpha_\epsilon + T_\epsilon \sin \alpha_\epsilon + P_{on} \cos \alpha_{on} + T_{on} \sin \alpha_{on} = 0. \end{cases} \quad (2.38)$$

При переходе к напряжениям и с учетом закона трения согласно формулам (2.2), (2.3) система уравнений (2.38) примет следующий вид:

$$\begin{cases} p_\epsilon F_\kappa^\epsilon \sin \alpha_\epsilon + p_\epsilon f_\epsilon F_\kappa^\epsilon \cos \alpha_\epsilon - p_{on} F_\kappa^{on} \sin \alpha_{on} + p_{on} f_{on} F_\kappa^{on} \cos \alpha_{on} - \\ - \sigma_x F_1^{oo} + \sigma_x F_0^{oo} - d\sigma_x F_0^{oo} = 0; \\ -p_\epsilon F_\kappa^\epsilon \cos \alpha_\epsilon + p_\epsilon f_\epsilon F_\kappa^\epsilon \sin \alpha_\epsilon + p_{on} F_\kappa^{on} \cos \alpha_{on} + p_{on} f_{on} F_\kappa^{on} \sin \alpha_{on} = 0. \end{cases} \quad (2.39)$$

Для рассматриваемого кольцевого элемента также принималось, что координатные оси x и ρ совпадают соответственно с направлениями главных напряжений σ_{11} и σ_{33} . Учитывая малость в различии углов наклона образующих конусных участков волокна α_ϵ и самоустанавливающейся оправки α_{on} , принималось, что направление действия давлений p_ϵ и p_{on} совпадает с направлением σ_{33} . Также принималось, что эпюра продольного напряжения σ_x по толщине стенки имеет равномерный характер распределения. С учетом данного допущения, а также учитывая, что обе силы P_ϵ и P_{on} являются сжимающими, действие давлений p_ϵ и p_{on} усреднялось, полагая, что это не вносит большой погрешности в условие пластичности. С учетом принятых допущений условие пластичности представлялось в следующем виде:

$$\sigma_x = \sigma_S + \frac{1}{2}(p_\epsilon + p_{on}). \quad (2.40)$$

Таким образом, напряженное состояние выделенного сечения на участке основного обжатия определялось следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon} + p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} - p_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \alpha_{on} + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \alpha_{on} - \\ - \sigma_x F_1^{oo} + \sigma_x F_0^{oo} - d\sigma_x F_0^{oo} = 0; \\ - p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} + p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon} + p_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \alpha_{on} + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \alpha_{on} = 0; \\ \sigma_x = \sigma_S + \frac{1}{2}(p_{\epsilon} + p_{on}). \end{cases} \quad (2.41)$$

В системе уравнений (2.41) неизвестными параметрами являются давления p_{ϵ} и p_{on} , действующие на волоку и конус самоустанавливающейся оправки соответственно, и продольное напряжение σ_x .

Выполняя ряд преобразований второго уравнения в системе (2.41), оно представлялось относительно параметра p_{on} в следующем виде:

$$p_{on} = p_{\epsilon} \frac{F_{\kappa}^{\epsilon} (\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon})}{F_{\kappa}^{on} (\cos \alpha_{on} + f_{on} \sin \alpha_{on})}. \quad (2.42)$$

Третье уравнение системы (2.41) преобразовывалось с учетом формулы (2.42) и представлялось в следующем виде:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{d\sigma_S + A_1 dp_{\epsilon}}{dx}, \quad (2.43)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{\kappa}^{\epsilon} (\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon})}{F_{\kappa}^{on} (\cos \alpha_{on} + f_{on} \sin \alpha_{on})} + 1 \right).$$

После ряда преобразований первого уравнения в системе (2.41) с учетом формулы (2.42) имеем:

$$p_{\epsilon} \frac{2R}{\cos \alpha_{\epsilon} (R^2 - r^2)} B_1 + \sigma_x \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R^2 - r^2} = \frac{d\sigma_x}{dx}, \quad (2.44)$$

$$\text{где } B_1 = \sin \alpha_{\epsilon} + f_{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} - \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon})(\sin \alpha_{on} + f_{on} \cos \alpha_{on})}{\cos \alpha_{on} + f_{on} \sin \alpha_{on}}.$$

Уравнение (2.44) с учетом уравнения (2.43) приводилось к следующему виду:

$$p_{\epsilon} \left(\frac{2R B_1}{\cos \alpha_{\epsilon} (R^2 - r^2)} + \frac{2A_1 (R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R^2 - r^2} \right) - A_1 \frac{dp_{\epsilon}}{dx} = \frac{d\sigma_S}{dx} - \sigma_S \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R^2 - r^2}. \quad (2.45)$$

Таким образом, полученное уравнение (2.45) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка для участка основного обжатия трубы по толщине стенки.

2.3.2 Анализ схемы сил, приложенных к участку дополнительного обжатия

Схема сил, приложенных к кольцевому элементу протяженностью dx , выделенному на участке дополнительного обжатия по толщине стенки приведена на рисунке 2.6, а.

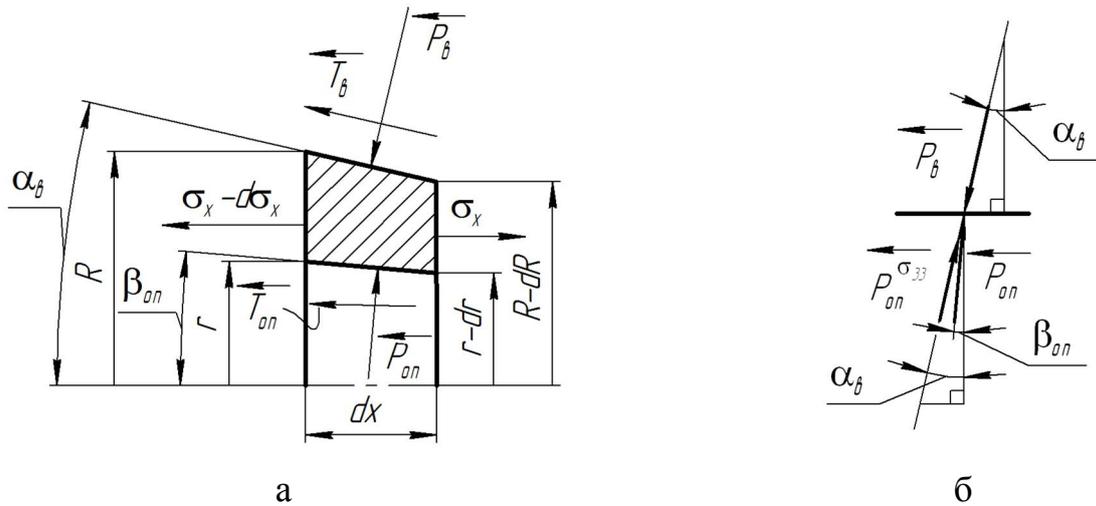


Рисунок 2.6 – Схемы сил приложенных к кольцевому элементу,

выделенному на участке дополнительного обжатия трубы по толщине стенки:

а – общий вид; б – к определению проекции p_{on} на направление σ_{33}

Уравнения равновесия проекции сил на оси x и ρ будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \sum x: & P_b \sin \alpha_b + T_b \cos \alpha_b - P_{on} \sin \beta_{on} + T_{on} \cos \beta_{on} - \sigma_x F_1^{\partial o} + \\ & + \sigma_x F_0^{\partial o} - d\sigma_x F_0^{\partial o} = 0; \\ \sum \rho: & -P_b \cos \alpha_b + T_b \sin \alpha_b + P_{on} \cos \beta_{on} + T_{on} \sin \beta_{on} = 0. \end{cases} \quad (2.46)$$

При переходе к напряжениям и с учетом закона трения система уравнений (2.46) примет следующий вид:

$$\begin{cases} p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon} + p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} - p_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} + \\ + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} - \sigma_x F_1^{\partial o} + \sigma_x F_0^{\partial o} - d\sigma_x F_0^{\partial o} = 0; \\ - p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} + p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon} + p_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} + \\ + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} = 0. \end{cases} \quad (2.47)$$

Для рассматриваемого кольцевого элемента также принималось, что координатные оси x и ρ сонаправлены с главными напряжениями σ_{11} и σ_{33} , при этом направление действия давления p_{ϵ} совпадает с направлением σ_{33} . Ввиду различия между углами α_{ϵ} и β_{on} более чем на 10 %, проекция давления p_{on} в направлении σ_{33} определялась согласно схеме на рисунке 2.6, б по следующей формуле:

$$p_{on}^{\sigma_{33}} = p_{on} \frac{\cos \beta_{on}}{\cos \alpha_{\epsilon}}. \quad (2.48)$$

Принималось также, что эпюра продольного напряжения σ_x по толщине стенки на данном участке имеет равномерный характер распределения. С учетом данного допущения, а также учитывая, что обе силы P_{ϵ} и P_{on} являются сжимающими, действие давлений p_{ϵ} и p_{on} усреднялось, полагая, что это не вносит большой погрешности в условие пластичности. Тогда с учетом формулы (2.48) условие пластичности представлялось в следующем виде:

$$\sigma_x = \sigma_S + \frac{1}{2} \left(p_{\epsilon} + p_{on} \frac{\cos \beta_{on}}{\cos \alpha_{\epsilon}} \right). \quad (2.49)$$

Таким образом, напряженное состояние выделенного кольцевого элемента на участке дополнительного обжатия по толщине стенки трубы определялось следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon} + p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} - p_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} + \\ + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} - \sigma_x F_1^{\dot{d}o} + \sigma_x F_0^{\dot{d}o} - d\sigma_x F_0^{\dot{d}o} = 0; \\ - p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} + p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon} + p_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} + \\ + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} = 0; \\ \sigma_x = \sigma_S + \frac{1}{2} \left(p_{\epsilon} + p_{on} \frac{\cos \beta_{on}}{\cos \alpha_{\epsilon}} \right). \end{array} \right. \quad (2.50)$$

В системе уравнений (2.50) неизвестными параметрами являются давления p_{ϵ} и p_{on} , действующие на волоку и цилиндр самоустанавливающейся оправки соответственно, и продольное напряжение σ_x .

Выполняя ряд преобразований второго уравнения в системе (2.50), оно представлялось относительно параметра p_{on} в следующем виде:

$$p_{on} = p_{\epsilon} \frac{F_{\kappa}^{\epsilon}}{F_{\kappa}^{on}} \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon})}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on})}. \quad (2.51)$$

Третье уравнение системы (2.50) преобразовывалось с учетом формулы (2.51) и представлялось в следующем виде:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{d\sigma_S + A_2 dp_{\epsilon}}{dx}, \quad (2.52)$$

$$\text{где } A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{\kappa}^{\epsilon}}{F_{\kappa}^{on}} \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon}) \cos \beta_{on}}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}) \cos \alpha_{\epsilon}} + 1 \right).$$

После последовательных преобразований первого уравнения в системе (2.50) с учетом формулы (2.51) имеем:

$$p_{\epsilon} \frac{2R}{\cos \alpha_{\epsilon} (R^2 - r^2)} B_2 + \sigma_x \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \beta_{on})}{R^2 - r^2} = \frac{d\sigma_x}{dx}, \quad (2.53)$$

$$\text{где } B_2 = \sin \alpha_{\epsilon} + f_{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} - \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon})(\sin \beta_{on} + f_{on} \cos \beta_{on})}{\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}}.$$

С учетом уравнения (2.52) уравнение (2.53) приводилось к следующему виду:

$$p_{\epsilon} \left(\frac{2 R B_2}{\cos \alpha_{\epsilon} (R^2 - r^2)} + \frac{2 A_2 (R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \beta_{on})}{R^2 - r^2} \right) - A_2 \frac{dp_{\epsilon}}{dx} = \frac{d\sigma_S}{dx} - \sigma_S \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \beta_{on})}{R^2 - r^2}. \quad (2.54)$$

Таким образом, полученное уравнение (2.54) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка для участка дополнительного обжатия трубы по толщине стенки.

2.3.3 Анализ схемы сил, приложенных к участку калибровки

Схема сил, приложенных к кольцевому элементу протяженностью dx , выделенному на участке калибровки трубы по наружному и внутреннему диаметрам приведена на рисунке 2.7.

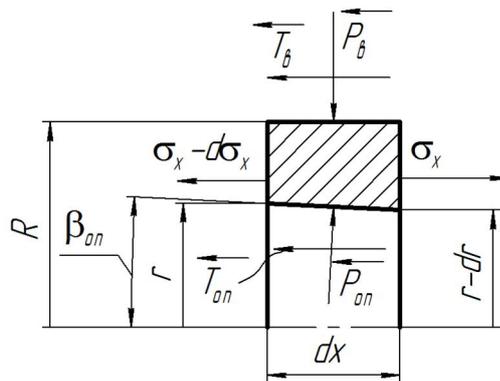


Рисунок 2.7 – Схема сил, приложенных к кольцевому элементу, выделенному на участке калибровки трубы по наружному и внутреннему диаметрам

Уравнения равновесия проекции сил на оси x и ρ будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \sum x: & T_{\epsilon} - P_{on} \sin \beta_{on} + T_{on} \cos \beta_{on} - \sigma_x F_1^{k\delta} + \sigma_x F_0^{k\delta} - d\sigma_x F_0^{k\delta} = 0; \\ \sum \rho: & -P_{\epsilon} + P_{on} \cos \beta_{on} + T_{on} \sin \beta_{on} = 0. \end{cases} \quad (2.55)$$

При переходе к напряжениям и с учетом закона трения система уравнений (2.55) примет следующий вид:

$$\begin{cases} p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} - p_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} - \sigma_x F_1^{\kappa d} + \sigma_x F_0^{\kappa d} - \\ - d\sigma_x F_0^{\kappa d} = 0; \\ - p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} + p_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} = 0. \end{cases} \quad (2.56)$$

Для рассматриваемого сечения также примем, что координатные оси x и r сонаправлены с главными напряжениями σ_{11} и σ_{33} . Учитывая малость угла β_{on} оправки, примем, что давления p_{ϵ} и p_{on} совпадают с направлением σ_{33} . Примем также, что эпюра продольного напряжения σ_x по толщине стенки на данном участке имеет равномерный характер распределения. С учетом данных допущений условие пластичности примет вид аналогичный формуле (2.40).

Таким образом, напряженное состояние выделенного сечения на участке калибровки по наружному и внутреннему диаметрам определялось следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} p_{\epsilon} f_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} - p_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} - \sigma_x F_1^{\kappa d} + \sigma_x F_0^{\kappa d} - \\ - d\sigma_x F_0^{\kappa d} = 0; \\ - p_{\epsilon} F_{\kappa}^{\epsilon} + p_{on} F_{\kappa}^{on} \cos \beta_{on} + p_{on} f_{on} F_{\kappa}^{on} \sin \beta_{on} = 0; \\ \sigma_x = \sigma_S + \frac{1}{2}(p_{\epsilon} + p_{on}). \end{cases} \quad (2.57)$$

В системе уравнений (2.57) неизвестными параметрами являются давления p_{ϵ} и p_{on} , действующие на пояске волокна и цилиндре самоустанавливающейся оправки соответственно, и продольное напряжение σ_x .

Выполняя ряд преобразований второго уравнения в системе (2.57), оно представлялось относительно параметра p_{on} в следующем виде:

$$p_{on} = p_{\epsilon} \frac{F_{\kappa}^{\epsilon}}{F_{\kappa}^{on}} \frac{1}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on})}. \quad (2.58)$$

Третье уравнение системы (2.57) преобразовывалось с учетом формулы (2.58) к следующему виду:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{d\sigma_S + A_3 dp_\epsilon}{dx}, \quad (2.59)$$

$$\text{где } A_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_\kappa^\epsilon}{F_\kappa^{on}} \frac{1}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on})} + 1 \right).$$

После последовательных преобразований первого уравнения в системе (2.57) с учетом формулы (2.58) имеем:

$$p_\epsilon \frac{2R}{R^2 - r^2} B_3 - \sigma_x \frac{2r \operatorname{tg} \beta_{on}}{R^2 - r^2} = \frac{d\sigma_x}{dx}, \quad (2.60)$$

$$\text{где } B_3 = f_\epsilon + \frac{f_{on} \cos \beta_{on} - \sin \beta_{on}}{\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}}.$$

С учетом уравнения (2.59) уравнение (2.60) приводилось к следующему виду:

$$p_\epsilon \frac{2}{R^2 - r^2} (B_3 R - A_3 r \operatorname{tg} \beta_{on}) - A_3 \frac{dp_\epsilon}{dx} = \frac{d\sigma_S}{dx} - \sigma_S \frac{2 A_3 r \operatorname{tg} \beta_{on}}{R^2 - r^2}. \quad (2.61)$$

Уравнение (2.61) представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка для участка калибровки трубы по наружному и внутреннему диаметрам.

2.4 Вывод линейных неоднородных дифференциальных уравнений равновесия и их анализ

На основе анализа схем сил, приложенных к кольцевым элементам, выделенным на участках очага деформации, контактируемых одновременно и с оправкой и с волокой, выявлено, что контактное давление p_ϵ , действующее на волоку по длине очага деформации, определяется следующими дифференциальными уравнениями:

- для участка основного обжатия по толщине стенки:

$$p_\epsilon \left(\frac{2R B_1}{\cos \alpha_\epsilon (R^2 - r^2)} + \frac{2 A_1 (R \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R^2 - r^2} \right) - A_1 \frac{dp_\epsilon}{dx} = \frac{d\sigma_S}{dx} - \sigma_S \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R^2 - r^2},$$

- для участка дополнительного обжатия по толщине стенки:

$$p_{\epsilon} \left(\frac{2 R B_2}{\cos \alpha_{\epsilon} (R^2 - r^2)} + \frac{2 A_2 (R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \beta_{on})}{R^2 - r^2} \right) - A_2 \frac{dp_{\epsilon}}{dx} = \frac{d\sigma_S}{dx} - \sigma_S \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - r \operatorname{tg} \beta_{on})}{R^2 - r^2};$$

- для участка калибровки по наружному и внутреннему диаметрам:

$$p_{\epsilon} \frac{2}{R^2 - r^2} (B_3 R - A_3 r \operatorname{tg} \beta_{on}) - A_3 \frac{dp_{\epsilon}}{dx} = \frac{d\sigma_S}{dx} - \sigma_S \frac{2 A_3 r \operatorname{tg} \beta_{on}}{R^2 - r^2},$$

где $A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{\kappa}^{\epsilon}}{F_{\kappa}^{on}} \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon}) \cos \beta_{on}}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}) \cos \alpha_{\epsilon}} + 1 \right);$

$$B_1 = \sin \alpha_{\epsilon} + f_{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} - \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon})(\sin \alpha_{on} + f_{on} \cos \alpha_{on})}{\cos \alpha_{on} + f_{on} \sin \alpha_{on}};$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{\kappa}^{\epsilon}}{F_{\kappa}^{on}} \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon}) \cos \beta_{on}}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}) \cos \alpha_{\epsilon}} + 1 \right);$$

$$B_2 = \sin \alpha_{\epsilon} + f_{\epsilon} \cos \alpha_{\epsilon} - \frac{(\cos \alpha_{\epsilon} - f_{\epsilon} \sin \alpha_{\epsilon})(\sin \beta_{on} + f_{on} \cos \beta_{on})}{\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}};$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{\kappa}^{\epsilon}}{F_{\kappa}^{on}} \frac{1}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on})} + 1 \right);$$

$$B_3 = f_{\epsilon} + \frac{f_{on} \cos \beta_{on} - \sin \beta_{on}}{\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}}.$$

Применяя ряд обозначений, полученные для каждого из рассматриваемых участков дифференциальные уравнения приводились к следующему виду:

$$\frac{dp_{\epsilon}}{dx} - A p_{\epsilon} = B \sigma_S - C \frac{d\sigma_S}{dx},$$

где p_{ϵ} – искомое давление на волоку;

σ_S – сопротивление пластической деформации;

A , B , C – характеристические коэффициенты, определяющие условия формоизменения трубы и отношение между параметрами профилировки технологического инструмента на соответствующих участках очага деформации.

Таким образом, получена следующая система линейных неоднородных дифференциальных уравнений равновесия для участков обжатия по толщине стенки и калибровки соответственно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_\epsilon}{dx} - A_{oo} p_\epsilon = B_{oo} \sigma_S - C_{oo} \frac{d\sigma_S}{dx}; \\ \frac{dp_\epsilon}{dx} - A_{\partial o} p_\epsilon = B_{\partial o} \sigma_S - C_{\partial o} \frac{d\sigma_S}{dx}; \\ \frac{dp_\epsilon}{dx} - A_{\kappa \partial} p_\epsilon = B_{\kappa \partial} \sigma_S - C_{\kappa \partial} \frac{d\sigma_S}{dx}, \end{array} \right. \quad (2.62)$$

$$\text{где } A_{oo} = \frac{2 R B_1}{\cos \alpha_\epsilon (R^2 - r^2)} + \frac{2 A_1 (R \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R^2 - r^2};$$

$$B_{oo} = \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r \operatorname{tg} \alpha_{on})}{A_1 (R^2 - r^2)};$$

$$C_{oo} = \frac{1}{A_1};$$

$$A_{\partial o} = \frac{2 R B_2}{A_2 \cos \alpha_\epsilon (R^2 - r^2)} + \frac{2 (R \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r \operatorname{tg} \beta_{on})}{R^2 - r^2};$$

$$B_{\partial o} = \frac{2(R \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r \operatorname{tg} \beta_{on})}{A_2 (R^2 - r^2)};$$

$$C_{\partial o} = \frac{1}{A_2};$$

$$A_{\kappa \partial} = \frac{2}{R^2 - r^2} \left(\frac{B_3}{A_3} R - r \operatorname{tg} \beta_{on} \right);$$

$$B_{\kappa \partial} = \frac{2 r \operatorname{tg} \beta_{on}}{R^2 - r^2};$$

$$C_{\kappa \partial} = \frac{1}{A_3}.$$

Искомым параметром в каждом из полученных уравнений является функция изменения давления p_ϵ , действующего на волоку по длине соответствующего участка очага деформации.

Решение каждого из уравнений в явном виде является затруднительным, поэтому для его решения требуется привлечение одного из известных в механике сплошных сред методов приближенного решения краевой задачи.

2.5 Разработка алгоритма решения системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений равновесия

В настоящее время наиболее универсальным методом решения подобных краевых задач считается прямой метод [110], основная идея которого заключается в том, чтобы решение исходной системы дифференциальных уравнений заменить решением системы линейных уравнений. Одним из вариантов прямого метода, хорошо подходящим к решению задач механики сплошных сред, является проекционный метод, согласно которому искомую функцию заменяют функцией заданного вида с неизвестными коэффициентами [110–112]. Точность этого метода зависит от того, насколько удачно выбрана функция заданного вида. Существенно снизить погрешность решения позволяет применение для аппроксимации приближенного решения методом конечных элементов. На основании этого можно отметить, что наиболее эффективным в заданных условиях рассматриваемой задачи является использование проекционного метода Бубнова-Галеркина при совместном применении метода конечных элементов (МКЭ). Метод Бубнова-Галеркина основан на минимизации ошибки приближенного решения исходного дифференциального уравнения [113, 114].

2.5.1 Применение метода конечных элементов

Пусть изменение контактного давления p_e по длине очага деформации l определяется кривой, приведенной на рисунке 2.8, где $p_e(x)$ искомая функция в рассматриваемой задаче.

Дискретизация функции изменения давления $p_e(x)$ по длине очага деформации выполнялась с помощью линейных одномерных симплекс-элементов.

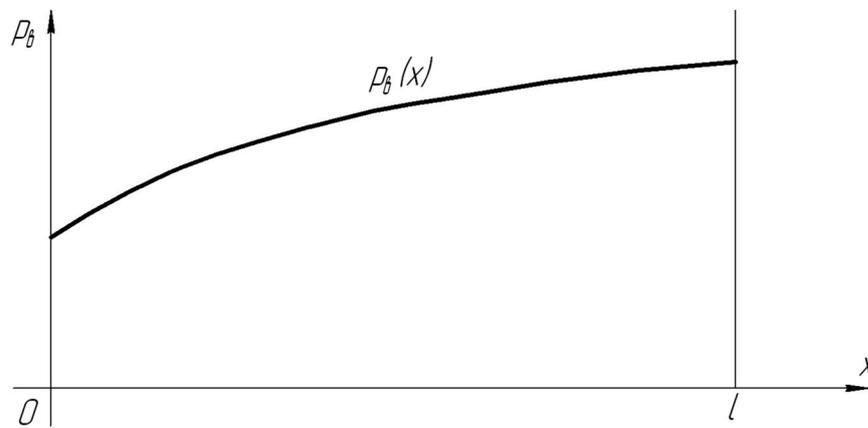


Рисунок 2.8 – Условная функция изменения давления на волоку $p_b(x)$ по длине очага деформации при волочении

При этом принималось, что на каждом из характерных деформационных участков, выделенных в очаге деформации, дискретная модель функции изменения давления $p_b(x)$, включает два равнозначных по длине элемента. Тогда весь очаг деформации будет состоять из восьми конечных элементов, каждый из которых ограничен двумя узлами. При этом все узлы, за исключением узлов №1 и №9, будут смежными для соседних элементов.

Дискретная модель функции изменения давления $p_b(x)$ по длине очага деформации приведена на рисунке 2.9.

Координаты выбранной конечно-элементной сетки для исследуемой области очага деформации приведены в таблице 2.1.

Вводились следующие обозначения:

- j – номер элемента, при этом j принимает значения от 3 до 8;
- i – номер узла элемента, при этом i принимает значения от 3 до 9.

С целью применения для решения рассматриваемой краевой задачи метода Бубнова-Галеркина приближение искомой функций представлялось в виде вектора \vec{p} , определяемого следующей формулой:

$$\vec{p} = F \vec{P}, \quad (2.63)$$

где F – матрица функций формы элементов;

\vec{P} – вектор узловых значений искомой функции.

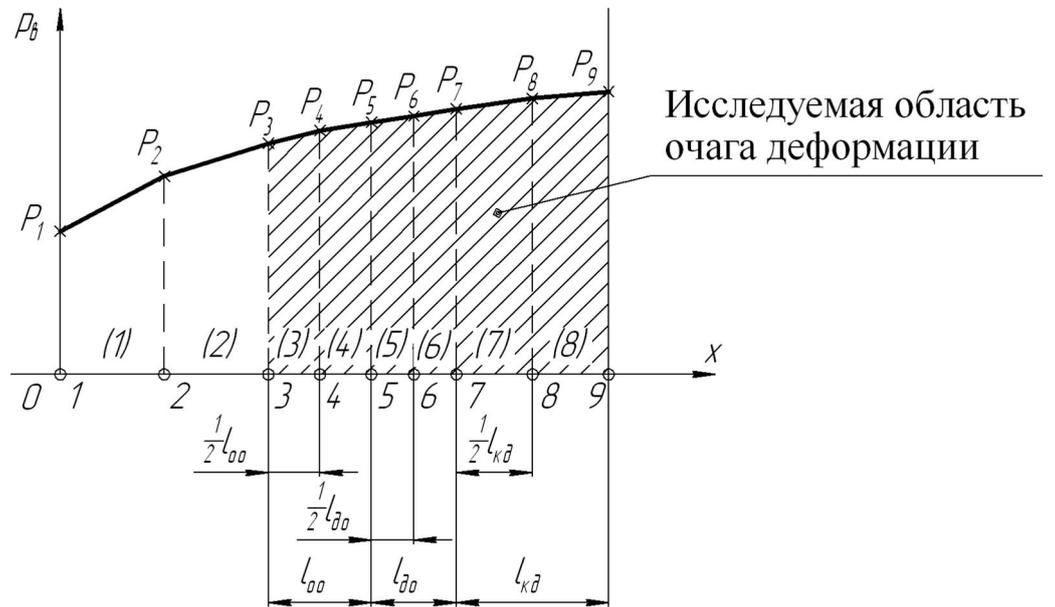


Рисунок 2.9 – Дискретная модель функции изменения давления на волоку $p_e(x)$ по длине очага деформации: (1)-(8) – номер элемента; 1-9 – номер узла элемента; P_1 - P_9 – узловые значения искомой функции

Таблица 2.1 – Координаты узловых значений дискретной модели функции изменения давления на волоку $p_e(x)$ в исследуемой области очага деформации

№ узла	Координата		
	ρ		x
	R	r	
3	$R_3 = R_p$	$r_3 = r_{к1}$	l_p
4	$R_4 = R_p - \frac{1}{2}(R_p - R_{oo})$	$r_4 = r_{к1} - \frac{1}{2}(r_{к1} - r_u)$	$l_p + \frac{1}{2}l_{oo}$
5	$R_5 = R_{oo}$	$r_5 = r_u$	$l_p + l_{oo}$
6	$R_6 = R_{oo} - \frac{1}{2}(R_{oo} - R_{нс})$	$r_6 = r_u - \frac{1}{2}(r_u - r_{до})$	$l_p + l_{oo} + \frac{1}{2}l_{до}$
7	$R_7 = R_{нс}$	$r_7 = r_{до}$	$l_p + l_{oo} + l_{до}$
8	$R_8 = R_{нс}$	$r_8 = r_{до} - \frac{1}{2}(r_{до} - r_m)$	$l_p + l_{oo} + l_{до} + \frac{1}{2}l_{кд}$
9	$R_9 = R_{нс}$	$r_9 = r_m$	$l_p + l_{oo} + l_{до} + l_{кд}$

Локальная аппроксимация искомой функции в пределах конечного элемента выполнялась следующим образом. Пусть для j -го элемента очага деформации дискретная модель функции изменения давления p_θ описывается прямой (Рисунок 2.10), уравнение которой имеет следующий вид:

$$\frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} = \frac{P_{i+1} - p^{(j)}}{P_{i+1} - P_i},$$

или с учетом ряда преобразований

$$p^{(j)} = \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} P_i + \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} P_{i+1}, \quad (2.64)$$

где $\frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} = \varphi_i^{(j)}(x)$, $\frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} = \varphi_{i+1}^{(j)}(x)$ – функции формы для j -ого элемента;

P_i, P_{i+1} – узловые значения искомой функции для j -ого элемента.

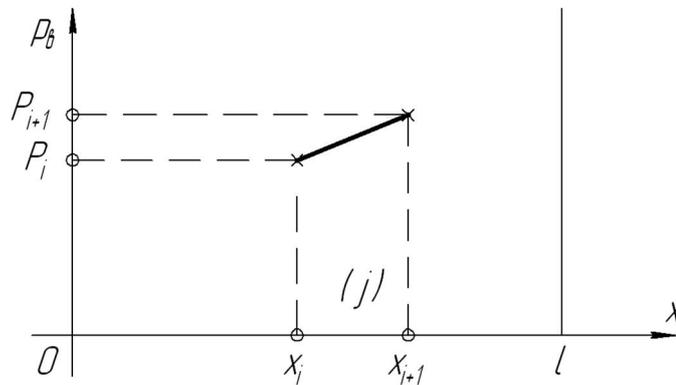


Рисунок 2.10 – Дискретная модель искомой функции $p_\theta(x)$ в пределах j -го элемента

Аналогичным способом аппроксимировалась функция изменения p_θ для каждого элемента, таким образом, линейная аппроксимация дискретной функции представлялась в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} p^{(1)} = \varphi_1^{(1)}(x) P_1 + \varphi_2^{(1)}(x) P_2 + \dots + \varphi_n^{(1)}(x) P_n + \varphi_{n+1}^{(1)}(x) P_{n+1}; \\ \dots \\ p^{(j)} = \varphi_1^{(2)}(x) P_1 + \varphi_2^{(2)}(x) P_2 + \dots + \varphi_i^{(2)}(x) P_i + \varphi_{i+1}^{(2)}(x) P_{i+1} + \dots \\ \dots + \varphi_n^{(2)}(x) P_n + \varphi_{n+1}^{(2)}(x) P_{n+1}; \\ \dots \\ p^{(n)} = \varphi_1^{(n)}(x) P_1 + \varphi_2^{(n)}(x) P_2 + \dots + \varphi_n^{(n)}(x) P_n + \varphi_{n+1}^{(n)}(x) P_{n+1}. \end{array} \right. \quad (2.65)$$

Учитывая, что функция формы отлична от нуля только в том случае, если номер узла совпадает с номером элемента или на единицу больше его, система (2.65) приводилась к следующему виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} p^{(1)} = \varphi_1^{(1)}(x) P_1 + \varphi_2^{(1)}(x) P_2 + \dots + 0 P_n + 0 P_{n+1}; \\ \dots \\ p^{(j)} = 0 P_1 + 0 P_2 + \dots + \varphi_i^{(j)}(x) P_i + \varphi_{i+1}^{(j)}(x) P_{i+1} + \dots + 0 P_n + 0 P_{n+1}; \\ \dots \\ p^{(n)} = 0 P_1 + 0 P_2 + \dots + \varphi_n^{(n)}(x) P_n + \varphi_{n+1}^{(n)}(x) P_{n+1}. \end{array} \right. \quad (2.66)$$

Далее система (2.66) представлялась в векторном виде согласно формуле (2.63) с получением результата глобальной аппроксимации искомой зависимости в общем виде:

$$\bar{p} = \begin{bmatrix} p^{(1)} \\ \dots \\ p^{(j)} \\ \dots \\ p^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1^{(1)}(x) & \varphi_2^{(1)}(x) & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \varphi_i^{(j)}(x) & \varphi_{i+1}^{(j)}(x) & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \varphi_n^{(n)}(x) & \varphi_{n+1}^{(n)}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_i \\ P_{i+1} \\ \dots \\ P_n \\ P_{n+1} \end{bmatrix}, \quad (2.67)$$

$$\text{где } F = \begin{bmatrix} \varphi_1^{(1)}(x) & \varphi_2^{(1)}(x) & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \varphi_i^{(j)}(x) & \varphi_{i+1}^{(j)}(x) & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \varphi_n^{(n)}(x) & \varphi_{n+1}^{(n)}(x) \end{bmatrix} \quad - \text{ матрица}$$

функций формы;

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_i \\ P_{i+1} \\ \dots \\ P_n \\ P_{n+1} \end{bmatrix} \quad - \text{ вектор узловых значений искомой функции } p_e(x).$$

С учетом выбранной конечно-элементной сетки для исследуемой области очага деформации формула (2.67) представлялась в следующем виде:

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} P^{(3)} \\ P^{(4)} \\ P^{(5)} \\ P^{(6)} \\ P^{(7)} \\ P^{(8)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_3^{(3)}(x) & \varphi_4^{(3)}(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_4^{(4)}(x) & \varphi_5^{(4)}(x) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_5^{(5)}(x) & \varphi_6^{(5)}(x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_6^{(6)}(x) & \varphi_7^{(6)}(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_7^{(7)}(x) & \varphi_8^{(7)}(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_8^{(8)}(x) & \varphi_9^{(8)}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Таким образом, решение поставленной краевой задачи сводилось к поиску узловых значений P_i аппроксимирующей функции, которые в наилучшей степени должны удовлетворять исходным дифференциальным уравнениям равновесия для каждого из исследуемых участков очага деформации.

2.5.2 Применение метода Бубнова-Галеркина

Полученные дифференциальные уравнения равновесия представлялись в следующем виде:

- для участка основного обжатия по толщине стенки:

$$R_{oo} = \left(\frac{dp_\epsilon}{dx} - A_{oo} p_\epsilon \right) - \left(B_{oo} \sigma_S - C_{oo} \frac{d\sigma_S}{dx} \right); \quad (2.69)$$

- для участка дополнительного обжатия по толщине стенки:

$$R_{\partial o} = \left(\frac{dp_\epsilon}{dx} - A_{\partial o} p_\epsilon \right) - \left(B_{\partial o} \sigma_S - C_{\partial o} \frac{d\sigma_S}{dx} \right); \quad (2.70)$$

- для участка калибровки по наружному и внутреннему диаметрам:

$$R_{\kappa \partial} = \left(\frac{dp_\epsilon}{dx} - A_{\kappa \partial} p_\epsilon \right) - \left(B_{\kappa \partial} \sigma_S - C_{\kappa \partial} \frac{d\sigma_S}{dx} \right). \quad (2.71)$$

Согласно методу Бубнова-Галеркина уравнения (2.69)-(2.71) будут представлять собой невязку R или функцию-ошибку, которую необходимо свести к минимуму, только в том случае, если искомая функция $p_\epsilon(x)$ будет заменена приближенными значениями. Обозначив их $\hat{p}_\epsilon(x)$, в общем виде невязка $R^{(j)}$ для j -ого элемента представлялась следующим образом:

$$R^{(j)} = \left(\frac{d \hat{p}_\epsilon^{(j)}}{dx} - A^{(j)} \hat{p}_\epsilon^{(j)} \right) - \left(B^{(j)} \sigma_S^{(j)} - C^{(j)} \frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx} \right), \quad (2.72)$$

где $\hat{p}_\epsilon^{(j)}$ определялась формулой (2.64) или в обобщенном виде:

$$\hat{p}_\epsilon^{(j)}(x) = \sum_{i=j}^{j+1} \varphi_i^{(j)}(x) P_i; \quad (2.73)$$

$A^{(j)}$, $B^{(j)}$, $C^{(j)}$ – характеристические коэффициенты при дифференциальном уравнении для j -ого элемента;

$\sigma_S^{(j)}$ – сопротивление металла пластической деформации для j -ого элемента.

Основным условием для поиска узловых значений по методу Бубнова-Галеркина является условие ортогональности невязки и функции формы, представляющее собой скалярное произведение следующего вида:

$$\left[R^{(j)}, \varphi_i^{(j)}(x) \right] = 0, \quad (2.74)$$

где $\varphi_i^{(j)}(x)$ – функция формы для j -ого элемента.

Согласно методу Бубнова-Галеркина условие (2.74) можно представить в следующем виде:

$$\int_0^l \sum_{j=3}^8 R^{(j)} \varphi_i^{(j)}(x) dx = 0,$$

или как систему линейных уравнений следующего вида:

$$\sum_{j=3}^8 \int_{x_i}^{x_{i+1}} R^{(j)} \varphi_i^{(j)}(x) dx = 0. \quad (2.75)$$

С учетом того, что каждый элемент дискретной модели определялся двумя функциями формы, например для j -ого элемента – $\varphi_i^{(j)}(x)$ и $\varphi_{i+1}^{(j)}(x)$, система (2.75) приводилась к следующему виду:

$$\sum_{j=3}^8 \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(R^{(j)} \varphi_i^{(j)}(x) + R^{(j)} \varphi_{i+1}^{(j)}(x) \right) dx = 0. \quad (2.76)$$

Для получения решения системы линейных уравнений (2.76) в общем виде, она преобразовывалась с учетом формул (2.72) и (2.73):

$$\begin{aligned} & \sum_{j=3}^8 \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left\{ \left[\frac{d}{dx} \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} P_i + \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} P_{i+1} \right) - A^{(j)} \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} P_i + \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} P_{i+1} \right) \right] - \right. \\ & \left. - \left(B^{(j)} \sigma_S^{(j)} - C^{(j)} \frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx} \right) \right] \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} \right) + \left[\frac{d}{dx} \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} P_i + \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} P_{i+1} \right) - \right. \\ & \left. - A^{(j)} \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} P_i + \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} P_{i+1} \right) - \left(B^{(j)} \sigma_S^{(j)} - C^{(j)} \frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx} \right) \right] \left(\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} \right) \right\} dx = 0. \quad (2.77) \end{aligned}$$

Учитывая, что дифференциал суммы тождественно равен сумме дифференциалов, а давления P_i и P_{i+1} не зависят от x , формула (2.77) представлялась в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=3}^8 \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left\{ \left[P_i \frac{d}{dx} \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} \right) + P_{i+1} \frac{d}{dx} \left(\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} \right) - A^{(j)} P_i \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} \right) - \right. \right. \\ & - A^{(j)} P_{i+1} \left(\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} \right) - \left. \left(B^{(j)} \sigma_S^{(j)} - C^{(j)} \frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx} \right) \right] \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} \right) + \left[P_i \frac{d}{dx} \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} \right) + \right. \\ & + P_{i+1} \frac{d}{dx} \left(\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} \right) - A^{(j)} P_i \left(\frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i} \right) - A^{(j)} P_{i+1} \left(\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} \right) - \\ & \left. \left. - \left(B^{(j)} \sigma_S^{(j)} - C^{(j)} \frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx} \right) \right] \left(\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} \right) \right\} dx = 0. \end{aligned} \quad (2.78)$$

Далее определялось сопротивление металла пластической деформации и его производная для j -ого элемента согласно принятому подходу решения краевой задачи. В соответствии с формулой (2.1) изменение сопротивления металла пластической деформации для j -ого элемента $\sigma_S^{(j)}$ представлялось следующим образом:

$$\sigma_S^{(j)} = \sigma_{S0} + a \left(\varepsilon^{(j)} \right)^b. \quad (2.79)$$

Степень деформации j -ого элемента $\varepsilon^{(j)}$ выражалась через текущую координату x и параметры формоизменения наружного $R_0^{(j)}$ и внутреннего $r_0^{(j)}$ радиусов деформируемой трубы:

$$\varepsilon^{(j)} = \frac{R_0^2 - r_0^2 - \left(R_0^{(j)} \right)^2 + \left(r_0^{(j)} \right)^2 + 2 R_a^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2}, \quad (2.80)$$

где R_0, r_0 – наружный и внутренний диаметры трубной заготовки;

$R_0^{(j)}, r_0^{(j)}$ – начальные наружный и внутренний диаметры j -ого элемента;

$R_\alpha^{(j)}$ – отношение связи между наружным и внутренним радиусом деформируемой трубы для j -ого элемента, определяемое отдельно для каждого из выделенных в очаге деформации участков;

x – текущая координата по длине очага деформации.

После чего формула (2.81) преобразовывалась к следующему виду:

$$\varepsilon^{(j)} = \frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \left(1 + \frac{2 R_\alpha^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} \right). \quad (2.81)$$

Учитывая, что в формуле (2.81) величина $\varepsilon^{(j)}$ выражается в относительных единицах, формула (2.79) приводилась к следующему виду:

$$\sigma_S^{(j)} = \sigma_{S0} + a (100 \varepsilon^{(j)})^b. \quad (2.82)$$

Дифференциал $\frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx}$ определялся с учетом формулы (2.82) следующим

образом:

$$\frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx} = \frac{d\sigma_{S0}}{dx} + a \frac{d(100\varepsilon^{(j)})^b}{dx} = 0 + 100ab(\varepsilon^{(j)})^{b-1} \frac{d\varepsilon^{(j)}}{dx}. \quad (2.83)$$

Формулы (2.82) и (2.83) преобразовывались с учетом формулы (2.81) к следующему виду:

$$\sigma_S^{(j)} = \sigma_{S0} + a100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \left(1 + \frac{2 R_\alpha^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} \right)^b; \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_S^{(j)}}{dx} = ab 100^{b-1} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \left(1 + \frac{2 R_\alpha^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} \right)^{b-1} \times \\ \times \frac{200 R_\alpha^{(j)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)}. \end{aligned} \quad (2.85)$$

Уравнение (2.78) с учетом формул (2.84), (2.85), а также после выполнения операций дифференцирования, последовательного умножения функций формы на

соответствующие слагаемые и последующего приведения подобных представлялось в следующем виде:

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=3}^8 \left\{ \left[P_i \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(\frac{-x_{i+1} - A^{(j)} x_{i+1}^2}{x_{i+1} - x_i} + \frac{(2A^{(j)} x_{i+1} + 1)x}{x_{i+1} - x_i} - \frac{A^{(j)} x^2}{x_{i+1} - x_i} \right) dx + \right. \right. \\
& + P_{i+1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(\frac{x_{i+1} (A^{(j)} x_i + 1)}{x_{i+1} - x_i} - \frac{(A^{(j)} (x_{i+1} + x_i) + 1)x}{x_{i+1} - x_i} + \frac{A^{(j)} x^2}{x_{i+1} - x_i} \right) dx - \\
& - \sigma_{S_0} B^{(j)} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(\frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} \right) dx - B^{(j)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \times \\
& \times \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(1 + \frac{2 R_\alpha^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} \right)^b \left(\frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} \right) dx + C^{(j)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_\alpha^{(j)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \times \\
& \times \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(1 + \frac{2 R_\alpha^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} \right)^{b-1} \left(\frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} \right) dx \left. \right] + \\
& + \left[P_i \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(\frac{x_i (A^{(j)} x_{i+1} + 1)}{x_{i+1} - x_i} - \frac{(A^{(j)} (x_{i+1} + x_i) + 1)x}{x_{i+1} - x_i} + \frac{A^{(j)} x^2}{x_{i+1} - x_i} \right) dx + \right. \\
& + P_{i+1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(\frac{-x_i - A^{(j)} x_i^2}{x_{i+1} - x_i} + \frac{(2A^{(j)} x_i + 1)x}{x_{i+1} - x_i} - \frac{A^{(j)} x^2}{x_{i+1} - x_i} \right) dx - \sigma_{S_0} B^{(j)} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(\frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \right) dx - \\
& - B^{(j)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(1 + \frac{2 R_\alpha^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} \right)^b \times \\
& \times \left(\frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \right) dx + C^{(j)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_\alpha^{(j)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times \\
& \times \left. \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(1 + \frac{2 R_\alpha^{(j)} x}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} \right)^{b-1} \left(\frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \right) dx \right\} = 0. \quad (2.86)
\end{aligned}$$

Уравнение (2.86) интегрировалось и после ряда преобразований представлялось в следующем виде:

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=3}^8 \left\{ P_i \left(x_i - x_{i+1} - \frac{1}{2} A^{(j)} (x_{i+1}^2 - x_i^2) \right) + P_{i+1} \left(x_{i+1} - x_i - \frac{1}{2} A^{(j)} (3x_i^2 + x_{i+1}^2) \right) - \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{2} \sigma_{S_0} B^{(j)} (x_{i+1} - x_i) - B^{(j)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \times \right. \\
& \quad \times \left[\frac{- \left(\frac{2 R_\alpha^{(j)} x_i}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_\alpha^{(j)} x_{i+1}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_\alpha^{(j)}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} (1+b)} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{x_i \left(\frac{2 R_\alpha^{(j)} x_i}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b - x_{i+1} \left(\frac{2 R_\alpha^{(j)} x_{i+1}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b}{1+b} \right] + \\
& \quad + C^{(j)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_\alpha^{(j)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times \\
& \quad \times \left[\frac{- \left(\frac{2 R_\alpha^{(j)} x_i}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_\alpha^{(j)} x_{i+1}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_\alpha^{(j)} b}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}} \right] \Big\} = 0, \quad (2.87)
\end{aligned}$$

где P_i, P_{i+1} – узловые значения искомой функции $p_e(x)$;

x_i, x_{i+1} – осевые координаты узлов конечных элементов по длине очага деформации;

σ_{S0} – сопротивление пластической деформации в недеформированном состоянии;

a, b – реологические коэффициенты, определяющие интенсивность изменения сопротивления металла пластической деформации;

R_0, r_0 – наружный и внутренний радиусы трубной заготовки;

$R_0^{(j)}, r_0^{(j)}$ – наружный и внутренний радиус деформируемой трубы в начале j -ого элемента;

$A^{(j)}, B^{(j)}, C^{(j)}$ – характеристические коэффициенты при дифференциальном уравнении для j -ого элемента;

$R_\alpha^{(j)}$ – отношение связи между наружным и внутренним радиусом деформируемой трубы для j -ого элемента.

Применительно к выбранной конечно-элементной сетке и с учетом переноса слагаемых с узловыми значениями за знак равенства система уравнений (2.87) представлялась следующим образом:

$$\begin{cases} P_3 K_{33} + P_4 K_{34} = N_3; \\ P_4 K_{44} + P_5 K_{45} = N_4; \\ P_5 K_{55} + P_6 K_{56} = N_5; \\ P_6 K_{66} + P_7 K_{67} = N_6; \\ P_7 K_{77} + P_8 K_{78} = N_7; \\ P_8 K_{88} + P_9 K_{89} = N_8, \end{cases} \quad (2.88)$$

где $K_{33}, K_{34}, K_{44}, K_{45}, K_{55}, K_{56}, K_{66}, K_{67}, K_{77}, K_{78}, K_{88}, K_{89}$ – коэффициенты при узловых значениях, являющиеся функциями от x и $A^{(j)}$;

$N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8$ – свободные члены, являющиеся функциями от $\sigma_{S0}, x, R, r, B^{(j)}, C^{(j)}$ и $R_\alpha^{(j)}$.

Коэффициенты и свободные члены системы уравнения (2.88) определялись следующим образом:

$$K_{33} = x_3 - x_4 - \frac{1}{2} A^{(3)} (x_4^2 - x_3^2);$$

$$K_{34} = x_4 - x_3 - \frac{1}{2} A^{(3)} (3x_3^2 + x_4^2);$$

$$K_{44} = x_4 - x_5 - \frac{1}{2} A^{(4)} (x_5^2 - x_4^2);$$

$$K_{45} = x_5 - x_4 - \frac{1}{2} A^{(4)} (3x_4^2 + x_5^2);$$

$$K_{55} = x_5 - x_6 - \frac{1}{2} A^{(5)} (x_6^2 - x_5^2);$$

$$K_{56} = x_6 - x_5 - \frac{1}{2} A^{(5)} (3x_5^2 + x_6^2);$$

$$K_{66} = x_6 - x_7 - \frac{1}{2} A^{(6)} (x_7^2 - x_6^2);$$

$$K_{67} = x_7 - x_6 - \frac{1}{2} A^{(6)} (3x_6^2 + x_7^2);$$

$$K_{77} = x_7 - x_8 - \frac{1}{2} A^{(7)} (x_8^2 - x_7^2);$$

$$K_{78} = x_8 - x_7 - \frac{1}{2} A^{(7)} (3x_7^2 + x_8^2);$$

$$K_{88} = x_8 - x_9 - \frac{1}{2} A^{(8)} (x_9^2 - x_8^2);$$

$$K_{89} = x_9 - x_8 - \frac{1}{2} A^{(8)} (3x_8^2 + x_9^2);$$

$$N_3 = \frac{1}{2} \sigma_{S0} B^{(3)} (x_4 - x_3);$$

$$N_4 = \frac{1}{2} \sigma_{S0} B^{(4)} (x_5 - x_4) - B^{(4)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \times$$

$$\times \left(\frac{- \left(\frac{2 R_\alpha^{(4)} x_4}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_\alpha^{(4)} x_5}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_\alpha^{(4)}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2} (1+b)} \right) +$$

$$\begin{aligned}
& \left. + \frac{x_4 \left(\frac{2 R_\alpha^{(4)} x_4}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2} + 1 \right)^b - x_5 \left(\frac{2 R_\alpha^{(4)} x_5}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2} + 1 \right)^b}{1+b} \right. + \\
& \quad + C^{(4)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_\alpha^{(4)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times \\
& \quad \times \left(\frac{- \left(\frac{2 R_\alpha^{(4)} x_4}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_\alpha^{(4)} x_5}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_\alpha^{(4)} b}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(4)})^2 + (r_0^{(4)})^2}} \right); \\
& \quad N_5 = \frac{1}{2} \sigma_{S0} B^{(5)} (x_6 - x_5) - B^{(5)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \times \\
& \quad \times \left(\frac{- \left(\frac{2 R_\alpha^{(5)} x_5}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_\alpha^{(5)} x_6}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_\alpha^{(5)}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2} (1+b)} \right) + \\
& \quad \left. + \frac{x_5 \left(\frac{2 R_\alpha^{(5)} x_5}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2} + 1 \right)^b - x_6 \left(\frac{2 R_\alpha^{(5)} x_6}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2} + 1 \right)^b}{1+b} \right. + \\
& \quad + C^{(5)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_\alpha^{(5)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\frac{\left(-\left(\frac{2 R_{\alpha}^{(5)} x_5}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(5)} x_6}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2} + 1 \right)^b \right)}{\frac{2 R_{\alpha}^{(5)} b}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(5)})^2 + (r_0^{(5)})^2}} \right]; \\
& N_6 = \frac{1}{2} \sigma_{S_0} B^{(6)} (x_7 - x_6) - B^{(6)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \times \\
& \times \left[\frac{\left(-\left(\frac{2 R_{\alpha}^{(6)} x_6}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(6)} x_7}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2} + 1 \right)^b \right)}{\frac{2 R_{\alpha}^{(6)}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2} (1+b)} + \right. \\
& \left. + \frac{x_6 \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(6)} x_6}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2} + 1 \right)^b - x_6 \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(6)} x_7}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2} + 1 \right)^b}{1+b} \right] + \\
& + C^{(6)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_{\alpha}^{(6)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times \\
& \times \left[\frac{\left(-\left(\frac{2 R_{\alpha}^{(6)} x_6}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(6)} x_7}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2} + 1 \right)^b \right)}{\frac{2 R_{\alpha}^{(6)} b}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(6)})^2 + (r_0^{(6)})^2}} \right]; \\
& N_7 = \frac{1}{2} \sigma_{S_0} B^{(7)} (x_8 - x_7) - B^{(7)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{- \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(7)} x_7}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(7)} x_8}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_{\alpha}^{(7)}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2} (1+b)} + \right. \\
& \left. + \frac{x_7 \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(7)} x_7}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2} + 1 \right)^b - x_8 \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(7)} x_8}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2} + 1 \right)^b}{1+b} \right) + \\
& + C^{(7)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_{\alpha}^{(7)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times \\
& \times \left(\frac{- \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(7)} x_7}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(7)} x_8}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_{\alpha}^{(7)} b}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(7)})^2 + (r_0^{(7)})^2}} \right); \\
& N_8 = \frac{1}{2} \sigma_{S_0} B^{(8)} (x_9 - x_8) - B^{(8)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \times \\
& \times \left(\frac{- \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(8)} x_8}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(8)} x_9}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_{\alpha}^{(8)}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2} (1+b)} + \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. + \frac{x_8 \left(\frac{2 R_\alpha^{(8)} x_8}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2} + 1 \right)^b - x_9 \left(\frac{2 R_\alpha^{(8)} x_9}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2} + 1 \right)^b}{1+b} \right\} + \\
& + C^{(8)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_\alpha^{(8)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times \\
& \times \left(\frac{- \left(\frac{2 R_\alpha^{(8)} x_8}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_\alpha^{(8)} x_9}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_\alpha^{(8)} b}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(8)})^2 + (r_0^{(8)})^2}} \right).
\end{aligned}$$

Текущие координаты узлов конечных элементов по длине очага деформации – x , R , r – определялись в соответствии с выбранной расчетной схемой очага деформации и конечно-элементной сеткой (Рисунок 2.9) и приведены в таблице 2.1. Параметры $A^{(j)}$, $B^{(j)}$, $C^{(j)}$, $R_\alpha^{(j)}$ для соответствующего элемента и участка очага деформации приведены в таблице 2.2.

Полученная таким образом система линейных уравнений определяется характеристическими коэффициентами, зависящими от условий формоизменения трубы и отношением между параметрами профилировки инструмента на соответствующих участках очага деформации.

Представленная система (2.88) состоит из 6 уравнений и при этом включает 7 искомых узловых значений. Таким образом, она является неопределимой. Для приведения полученного решения к частному, граничное условие, определяемое условием пластичности, принималось в следующем виде:

$$P_\epsilon \Big|_{x=x_3} = -\sigma_{S0}, \quad (2.95)$$

где x_3 – осевая координата начала контакта трубы с оправкой.

Таблица 2.2 – Параметры $A^{(j)}$, $B^{(j)}$, $C^{(j)}$ и $R_\alpha^{(j)}$ для соответствующего элемента и участка очага деформации

Параметр	Номер элемента на участке	
	основного обжатия по толщине стенки	
	(3)	(4)
$A^{(j)}$	$A^{(3)} = \frac{2 R_3 B_1}{A_1 \cos \alpha_\epsilon (R_3^2 - r_3^2)} + \frac{2 (R_3 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_3 \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R_3^2 - r_3^2}$	$A^{(4)} = \frac{2 R_4 B_1}{A_1 \cos \alpha_\epsilon (R_4^2 - r_4^2)} + \frac{2 (R_4 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_4 \operatorname{tg} \alpha_{on})}{R_4^2 - r_4^2}$
$B^{(j)}$	$B^{(3)} = \frac{2 (R_3 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_3 \operatorname{tg} \alpha_{on})}{A_1 (R_3^2 - r_3^2)}$	$B^{(4)} = \frac{2 (R_4 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_4 \operatorname{tg} \alpha_{on})}{A_1 (R_4^2 - r_4^2)}$
$C^{(j)}$	$C^{(3)} = \frac{1}{A_1}$	$C^{(4)} = \frac{1}{A_1}$
$R_\alpha^{(j)}$	$R_\alpha^{(3)} = R_0^{(3)} \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_0^{(3)} \operatorname{tg} \alpha_{on} = R_3 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_3 \operatorname{tg} \alpha_{on}$	$R_\alpha^{(4)} = R_0^{(4)} \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_0^{(4)} \operatorname{tg} \alpha_{on} = R_4 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_4 \operatorname{tg} \alpha_{on}$

Продолжение таблицы 2.2

Параметр	Номер элемента на участке	
	дополнительного обжатия по толщине стенки	
	(5)	(6)
$A^{(j)}$	$A^{(5)} = \frac{2 R_5 B_2}{A_2 \cos \alpha_\epsilon (R_5^2 - r_5^2)} + \frac{2 (R_5 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_5 \operatorname{tg} \beta_{on})}{R_5^2 - r_5^2}$	$A^{(6)} = \frac{2 R_6 B_2}{A_2 \cos \alpha_\epsilon (R_6^2 - r_6^2)} + \frac{2 (R_6 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_6 \operatorname{tg} \beta_{on})}{R_6^2 - r_6^2}$
$B^{(j)}$	$B^{(5)} = \frac{2 (R_5 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_5 \operatorname{tg} \beta_{on})}{A_2 (R_5^2 - r_5^2)}$	$B^{(6)} = \frac{2 (R_6 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_6 \operatorname{tg} \beta_{on})}{A_2 (R_6^2 - r_6^2)}$
$C^{(j)}$	$C^{(5)} = \frac{1}{A_2}$	$C^{(6)} = \frac{1}{A_2}$
$R_\alpha^{(j)}$	$R_\alpha^{(5)} = R_0^{(5)} \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_0^{(5)} \operatorname{tg} \beta_{on} = R_5 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_5 \operatorname{tg} \beta_{on}$	$R_\alpha^{(6)} = R_0^{(6)} \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_0^{(6)} \operatorname{tg} \beta_{on} = R_6 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - r_6 \operatorname{tg} \beta_{on}$

Продолжение таблицы 2.2

Параметр	Номер элемента на участке	
	калибровки по наружному и внутреннему диаметрам	
	(7)	(8)
$A^{(j)}$	$A^{(7)} = \frac{2}{R_7^2 - r_7^2} \left(\frac{B_3}{A_3} R_7 - r_7 \operatorname{tg} \beta_{on} \right)$	$A^{(8)} = \frac{2}{R_8^2 - r_8^2} \left(\frac{B_3}{A_3} R_8 - r_8 \operatorname{tg} \beta_{on} \right)$
$B^{(j)}$	$B^{(7)} = \frac{2 r_7 \operatorname{tg} \beta_{on}}{R_7^2 - r_7^2}$	$B^{(8)} = \frac{2 r_8 \operatorname{tg} \beta_{on}}{R_8^2 - r_8^2}$
$C^{(j)}$	$C^{(7)} = \frac{1}{A_3}$	$C^{(8)} = \frac{1}{A_3}$
$R_\alpha^{(j)}$	$R_\alpha^{(7)} = r_0^{(7)} \operatorname{tg} \beta_{on} = r_7 \operatorname{tg} \beta_{on}$	$R_\alpha^{(8)} = r_0^{(8)} \operatorname{tg} \beta_{on} = r_8 \operatorname{tg} \beta_{on}$

Примечания:

1. Радиусы $R_3 - R_8$ и $r_3 - r_8$ соответствуют координатам R и r для соответствующего узла согласно данным в таблице 2.1.

2. $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – коэффициенты связи между параметрами профилировки технологического инструмента, определяемые по следующим формулам:

$$A_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_\kappa^e}{F_\kappa^{on}} \frac{(\cos \alpha_e - f_e \sin \alpha_e)}{(\cos \alpha_{on} + f_{on} \sin \alpha_{on})} - 1 \right); \quad (2.89)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_\kappa^e}{F_\kappa^{ob}} \frac{(\cos \alpha_e - f_e \sin \alpha_e) \cos \beta_{on}}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}) \cos \alpha_e} - 1 \right); \quad (2.90)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_\kappa^e}{F_\kappa^{on}} \frac{1}{(\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on})} - 1 \right); \quad (2.91)$$

$$B_1 = \sin \alpha_e + f_e \cos \alpha_e - \frac{(\cos \alpha_e - f_e \sin \alpha_e)(\sin \alpha_{on} + f_{on} \cos \alpha_{on})}{\cos \alpha_{on} + f_{on} \sin \alpha_{on}}; \quad (2.92)$$

$$B_2 = \sin \alpha_e + f_e \cos \alpha_e - \frac{(\cos \alpha_e - f_e \sin \alpha_e)(\sin \beta_{on} + f_{on} \cos \beta_{on})}{\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}}; \quad (2.93)$$

$$B_3 = f_e + \frac{f_{on} \cos \beta_{on} - \sin \beta_{on}}{\cos \beta_{on} + f_{on} \sin \beta_{on}}. \quad (2.94)$$

Таким образом, условие (2,95) позволяет исключить одно неизвестное и привести систему уравнений (2.88) к решаемой.

2.6 Численное исследование математической модели системы

«волока – оправка – очаг деформации»

2.6.1 Анализ влияния степени и сопротивления пластической деформации на напряженное состояние при волочении на самоустанавливающейся оправке

Анализ влияния степени и сопротивления пластической деформации на энергосиловые параметры процесса оправочного волочения выполнялся на примере реального технологического маршрута, согласно информации, представленной в работах [27, 102]. Анализируемый маршрут волочения и соответствующие ему параметры деформации представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Анализируемый маршрут и его параметры деформации при волочении стальных труб на самоустанавливающейся оправке

Размеры трубы, мм				Абсолютное обжатие, мм		Коэффициент вытяжки	Степень дефор- мации, %
до деформации		после деформации		по наруж- ному диаметру	по толщине стенки		
D_z	S_z	D_m	S_m	ΔD	ΔS	μ	ε
9,5	0,61	7,0	0,50	2,5	0,11	1,61	37,9

Исследование выполнялось на примере волочения труб из стали марок 10, 9ХФ, 25ХГСА, 08Х18Н9Т. Сопротивление деформации σ_{S0} указанных сталей в недеформированном состоянии, а также реологические коэффициенты a и b , определяющие интенсивность изменения сопротивления пластической деформации, приведены в таблице 2.5 согласно данным работы [99]. Рассчитанное по формуле (2.1) для каждой рассматриваемой марки стали сопротивление пластической деформации σ_S приведено в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Сопротивление пластической деформации и реологические коэффициенты a и b стали марок 10, 9ХФ, 25ХГСА, 08Х18Н9Т

Марка стали	σ_{S0} , Н/мм ²	Реологические коэффициенты		Сопротивление пластической деформации σ_S , Н/мм ²
		a	b	
10	294	28,91	0,64	590
9ХФ	343	88,20	0,49	816
25ХГСА	372	55,86	0,57	867
08Х18Н9Т	402	23,52	0,91	1045

Выбор параметров профилировки инструмента выполнялся на основе рекомендаций, представленных в работах [25, 29, 103] и требований ГОСТ 2330: $\alpha_g = 13^\circ$; $\alpha_{on} = 9^\circ$; $\beta_{on} = 1^\circ$; $l_{ns} = 2,2$ мм; $d_u = 6,0$ мм. Длина участка дополнительного обжатия l_{do} определялась по формуле (2.5) при условии, что коэффициент $k = 0,5$. Принималось, что материал волокни – твердый сплав марки ВК8, материал самоустанавливающейся оправки – сталь. Коэффициенты трения на контактных поверхностях металла трубы с волокой f_g и самоустанавливающейся оправкой f_{on} принимались равными 0,05. Результаты расчета представлены на рисунках 2.11-2.13.

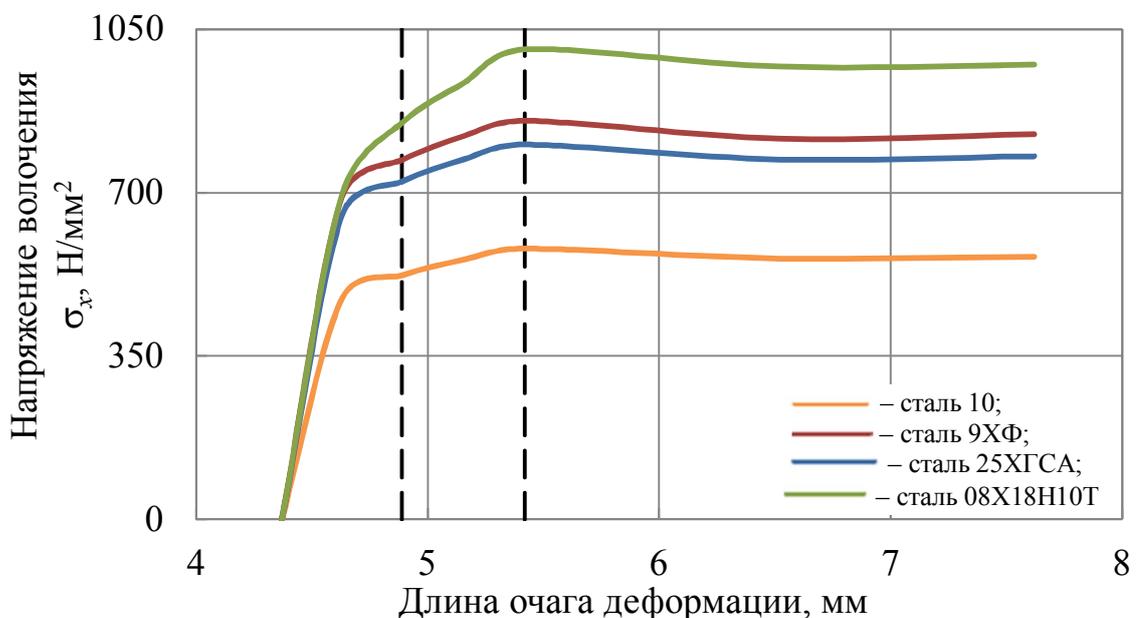


Рисунок 2.11 – Функции изменения напряжения волочения σ_x по длине исследуемой области очага деформации при волочении труб размерами $7,0 \times \text{вн} 6,0$ мм на самоустанавливающейся оправке

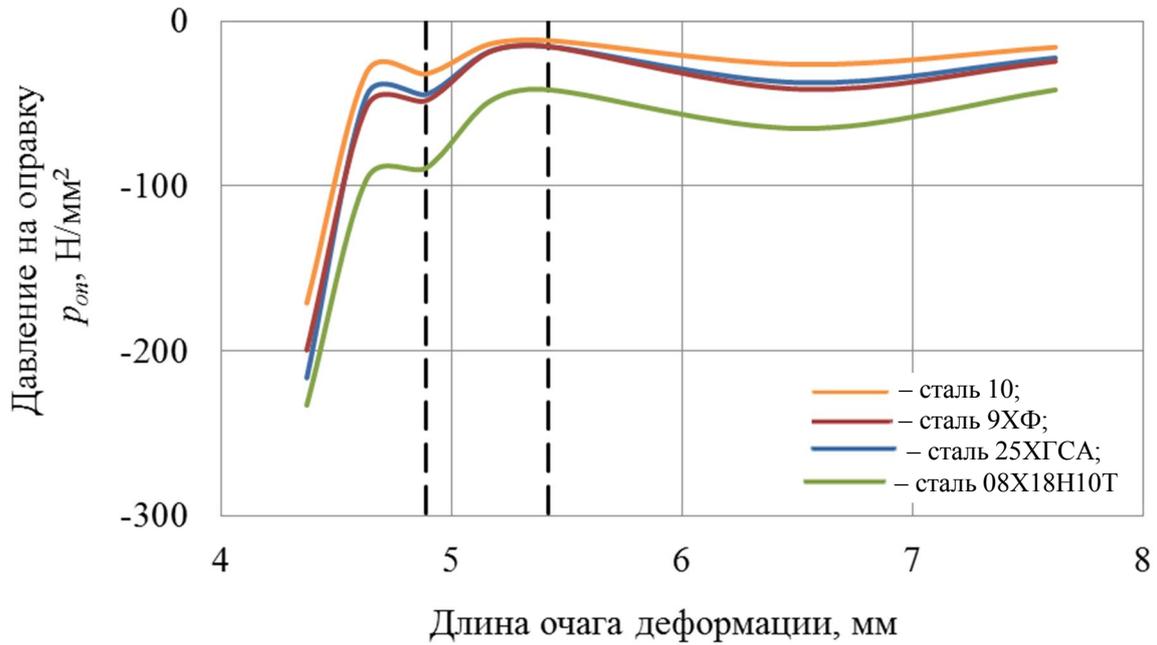


Рисунок 2.12 – Функции изменения давления на волоку p_e по длине исследуемой области очага деформации при волочении труб размерами $7,0 \times \text{вн}6,0$ мм на самоустанавливающейся оправке

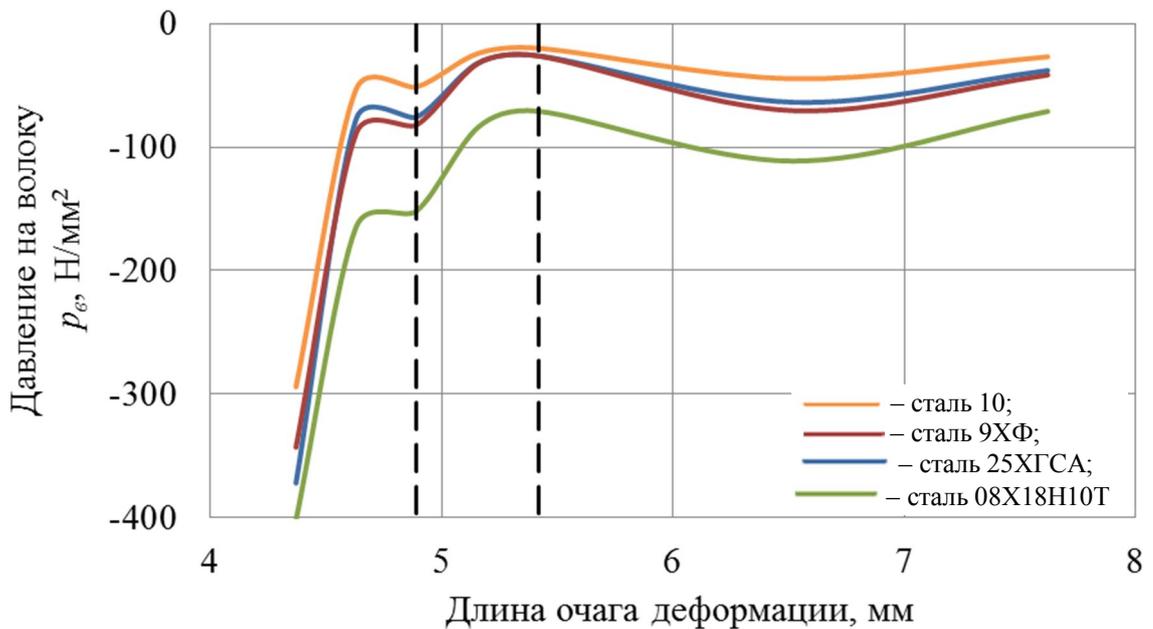


Рисунок 2.13 – Функции изменения давления на оправку p_{on} по длине исследуемой области очага деформации при волочении труб размерами $7,0 \times \text{вн}6,0$ мм на самоустанавливающейся оправке

На основе анализа представленных на рисунках 2.11-2.13 функций можно сделать следующие выводы:

1. Не зависимо от марки стали по всей исследуемой длине очага деформации давления p_{ϵ} и p_{on} являются сжимающими, а напряжение волочения σ_x – растягивающим, что согласуется с теорией волочения и косвенно подтверждает корректность представленного распределения.

2. При прочих равных условиях, для каждой из рассматриваемых марок стали с увеличением степени деформации ϵ напряжение волочения σ_x увеличивается (Рисунок 2.11). Также наблюдается тенденция увеличения напряжения волочения σ_x при увеличении сопротивления пластической деформации σ_S . При этом интенсивность изменения σ_x определяется интенсивностью изменения σ_S .

Экстремум функции изменения напряжения волочения σ_x наблюдается на границе обжимного и калибрующего участков.

3. Для каждой из рассматриваемых марок стали графические зависимости изменения давлений p_{ϵ} и p_{on} имеют схожий характер. При этом значения давления на волоку p_{ϵ} на всей рассматриваемой протяженности очага деформации превышают в 1,7–1,8 раза значения давлений на оправку p_{on} . Максимальные значения давлений p_{ϵ} и p_{on} наблюдаются в момент контакта внутренней поверхности трубы с конусом оправки.

Для участка дополнительного обжатия, где деформация по толщине стенки осуществляется на цилиндрическом участке оправки и сопровождается постепенным уменьшением величины обжатия, характерным является уменьшение давлений p_{ϵ} и p_{on} с достижением в конце рассматриваемого участка минимальных значений.

Незначительное увеличение давлений p_{ϵ} и p_{on} и соответственно уменьшение напряжения волочения σ_x на участке калибровки обусловлено

некоторым утолщением стенки ввиду исполнения цилиндрического участка оправки с некоторым углом наклона.

4. Анализ фактических граничных условий в конце процесса волочения согласно рисункам 2.11 и 2.12 показывает, что при $x = l_p$ разность $\sigma_x - \sigma_S$ соответствует значению p_ϵ , т.е. условие пластичности (2.95) выполняется.

5. Анализируя функцию изменения давления p_{on} , действующего на оправку по длине очага деформации, можно сделать вывод, что участками оправки, более подверженными износу, являются центральные зоны конуса и цилиндра. Данный факт согласуется с имеющейся в работе [29] информацией о наиболее изнашиваемых участках самоустанавливающейся оправки.

2.6.2 Анализ влияния параметров профилировки инструмента на напряженное состояние при волочении на самоустанавливающейся оправке

Так как стабильность процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке определяется, в том числе, разностью углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$, оценка изменения силовых параметров процесса в зависимости от профилировки технологического инструмента выполнялась на примере варьирования углов α_ϵ и α_{on} .

Угол α_ϵ согласно практике, сложившейся в волочильном производстве стальных труб, варьировался от 10° до 15° [105]. При этом разность углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$ задавалась равной от 1° до 5° согласно рекомендациям в работах [25, 27, 29]. Остальные исходные данные принимались аналогичными п.2.6.1.

Результаты численного исследования показали, что при увеличении разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$ в большей степени изменяется напряженное состояние узла №5, т.е. на участке основного обжатия по толщине стенки (Рисунок 2.9). На рисунке 2.14 представлены зависимости изменения продольного напряжения σ_x в рассматриваемом сечении очага деформации от разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$.

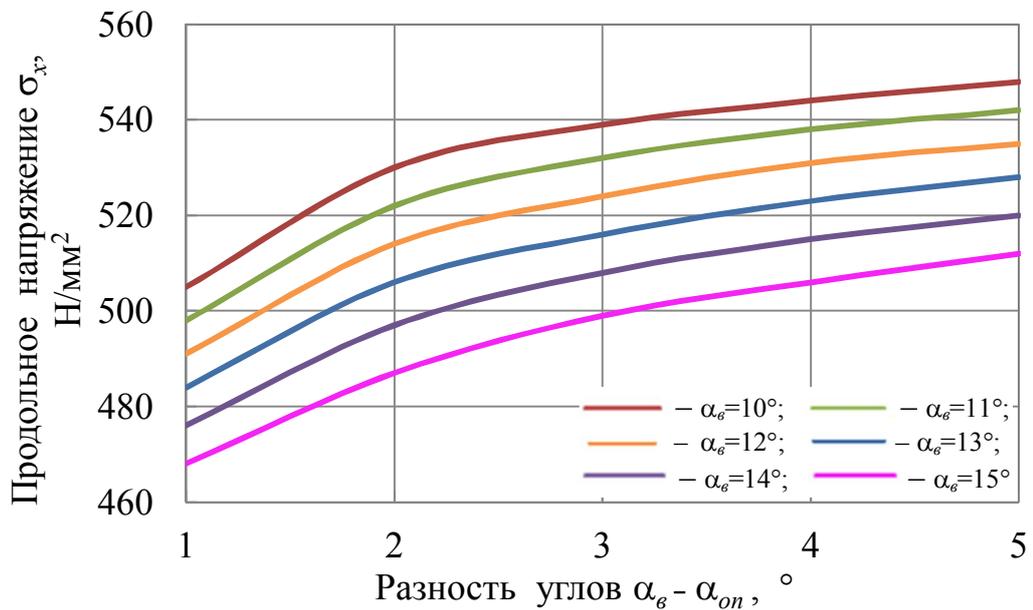


Рисунок 2.14 – Зависимость изменения продольного напряжения σ_x на участке основного обжатия по толщине стенки (узел №5) от разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$

Согласно представленным на рисунке 2.14 зависимостям, при прочих равных условиях, с увеличением разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$ на 1° продольное напряжение в рассматриваемом сечении увеличивается до 4%. При этом с увеличением угла волокна α_ϵ наблюдаются меньшие значения продольного напряжения.

Характер изменения давлений p_ϵ и p_{on} на участке основного обжатия по толщине стенки (узел №5) с увеличением разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$ обратный и более интенсивный (Рисунок 2.15): с увеличением разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$ на 1° давления уменьшаются на 10-30%. При этом с увеличением угла волокна α_ϵ наблюдаются большие значения давлений p_ϵ и p_{on} .

Обобщая результаты численного исследования влияния профилировки волокна и самоустанавливающейся оправки на энергосиловые параметры процесса деформации, сделан вывод: рациональным является осуществление волочения труб при разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$ от 1° до 3° , при использовании волокна с углом $\alpha_\epsilon = 13^\circ$ и самоустанавливающейся оправки с углом α_{on} от 10° до 12° .

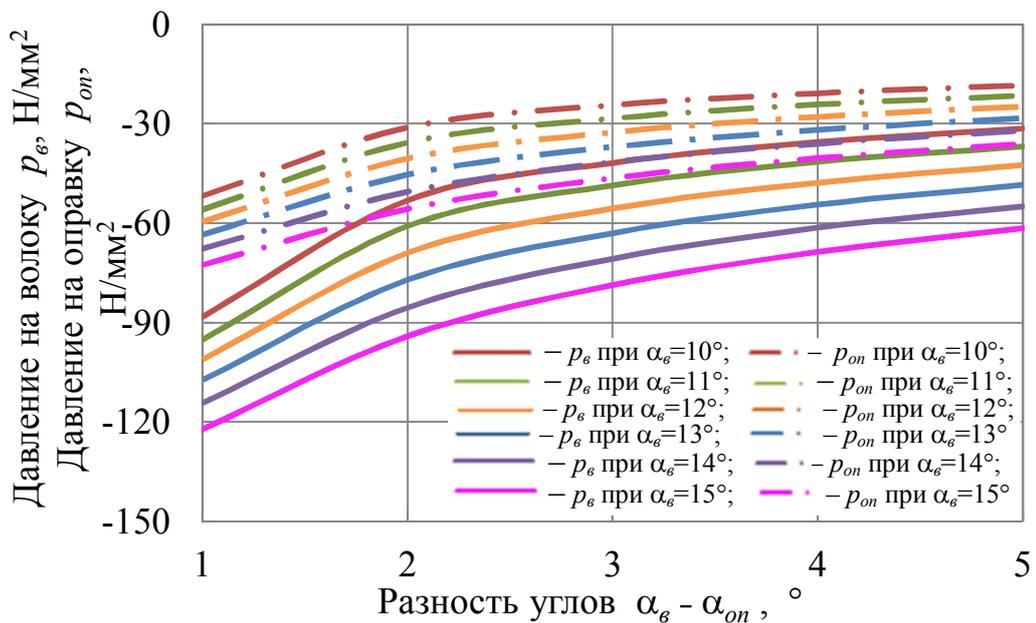


Рисунок 2.15 – Зависимость изменения давлений p_ϵ и p_{on} на участке основного обжата по толщине стенки (узел №5) от разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on}$

2.6.3 Анализ влияния коэффициента трения на напряженное состояние при волочении на самоустанавливающейся оправке

Оценка влияния коэффициента трения на энергосиловые параметры процесса волочения на самоустанавливающейся оправке выполнялась для маршрута, указанного в п.2.6.1, при следующих исходных данных:

- сталь марки 10, сопротивление деформации в недеформированном состоянии и реологические коэффициенты a и b которой приведены в таблице 2.5;
- волока с углом $\alpha_\epsilon = 13^\circ$ и самоустанавливающаяся оправка с углом α_{on} от 10° до 12° ;
- длина участка дополнительного обжата l_{do} определялась при $k = 0,5$, формула (2.5).

Граничные значения коэффициентов трения на контактной поверхности с волокой f_ϵ и самоустанавливающейся оправкой f_{on} , обеспечивающие устойчивость процесса волочения, т.е. равновесное положение самоустанавливающейся оправки, определялись из следующего условия [29]:

$$P_i^y \leq P_i^k, \quad (2.96)$$

где P_i^y , P_i^k – узловые значения давления, действующего на цилиндрический и конический участки самоустанавливающейся оправки.

Следует отметить, что в работах [115-117] условие (2.96) оценивалось только в зависимости от угла оправки α_{on} и коэффициента трения f_{on} , а влияние граничных условий на контактной поверхности с волокой пренебрегалось. Анализ условия (2.96) с использованием разработанной математической модели показал, что диапазон допускаемого изменения граничных условий на контактной поверхности может быть существенно увеличен. Уточненные граничные значения коэффициентов трения на контактной поверхности трубы с волокой и самоустанавливающейся оправкой представлены в таблицах 2.6 и 2.7 в зависимости от разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$.

Таблица 2.6 – Граничные значения коэффициентов трения на контактной поверхности трубы с волокой и самоустанавливающейся оправкой при разности углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 1^\circ$

Коэффициент трения f_{on}	Коэффициент трения f_g											
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,04	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,05	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,06	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,07	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,08	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,09	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,10	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
0,11	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
0,12	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+

Примечание – знак «-» обозначает, что условие (2.97) не выполняется; знак «+» – условие (2.97) выполняется

Таблица 2.7 – Граничные значения коэффициентов трения на контактной поверхности трубы с волокой и самоустанавливающейся оправкой при разности углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$

Коэффициент трения f_{on}	Коэффициент трения f_g											
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
0,03	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
0,04	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
0,05	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,06	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,07	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,08	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,09	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,11	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0,12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание – знак «-» обозначает, что условие (2.97) не выполняется; знак «+» – условие (2.97) выполняется

Анализ результатов данного численного исследования показал, что для принятых исходных данных с увеличением разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ диапазон допускаемых значений коэффициента трения увеличивается. Также установлено, что при перемещении самоустанавливающейся оправки от крайнего заднего к крайнему переднему положению очага деформации (т.е. при изменении коэффициента k в формуле (2.5) от 0,7 до 0,2 соответственно), диапазон допускаемых значений коэффициента трения сужается.

С использованием полученных результатов, а также учитывая, что профилировка самоустанавливающейся оправки позволяет создать гидродинамические условия трения, исследование энергосиловых параметров волочения осуществлялось при отношении $f_g / f_{on} \geq 1,0$.

Результаты численного исследования продольного напряжения σ_x от отношения коэффициентов трения f_6/f_{on} и разности углов $\alpha_6 - \alpha_{on}$ представлены на рисунке 2.17 для участка основного обжатия по толщине стенки (узел №5), как сечения очага деформации наиболее чувствительного к изменениям напряженного состояния.

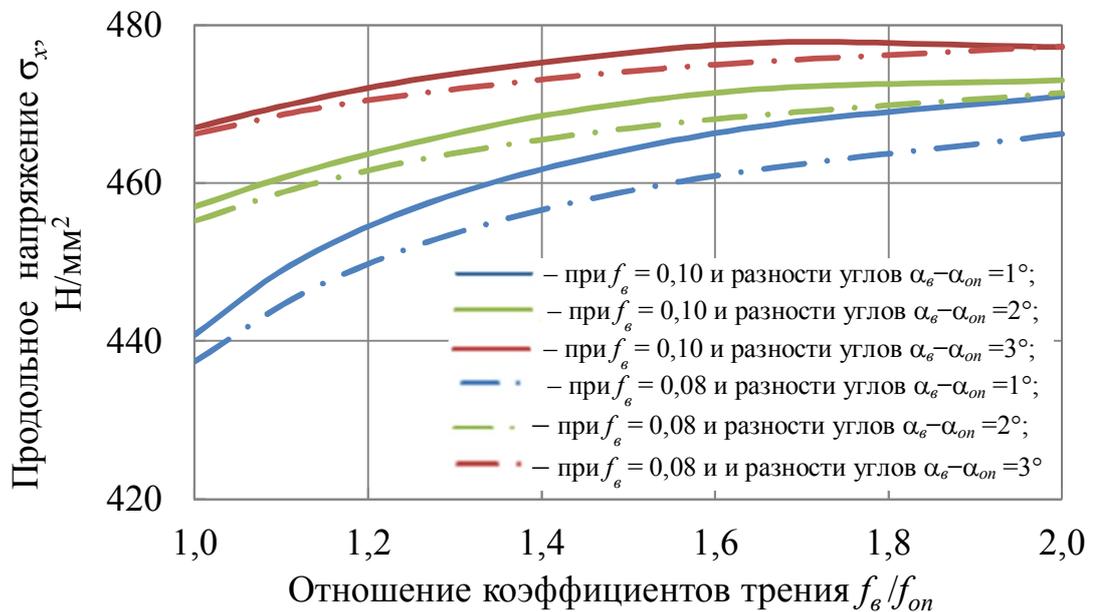


Рисунок 2.17 – Зависимость изменения продольного напряжения σ_x на участке основного обжатия по толщине стенки (узел №5) от отношения коэффициентов трения f_6/f_{on} и разности углов $\alpha_6 - \alpha_{on}$

Согласно зависимостям на рисунке 2.17, при прочих равных параметрах процесса волочения, увеличение коэффициента трения на контактной поверхности с волокой f_6 сопровождается увеличением продольного напряжения σ_x . При этом с увеличением разности углов $\alpha_6 - \alpha_{on}$ влияние коэффициента трения f_6 уменьшается. С увеличением отношения f_6/f_{on} , за счет уменьшения коэффициента трения f_{on} , продольное напряжение σ_x увеличивается, а влияние разности углов $\alpha_6 - \alpha_{on}$ уменьшается.

Характер влияния отношения f_{ϵ}/f_{on} на давления p_{ϵ} и p_{on} на участке основного обжатия по толщине стенки (узел №5) более интенсивный и обратный (Рисунок 2.18): с увеличением отношения f_{ϵ}/f_{on} давления p_{ϵ} и p_{on} уменьшаются. При этом до определенного значения f_{ϵ}/f_{on} меньшие значения давлений p_{ϵ} и p_{on} наблюдаются при разности углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on} = 3^{\circ}$, а свыше этого значения f_{ϵ}/f_{on} – при разности углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on} = 1^{\circ}$.

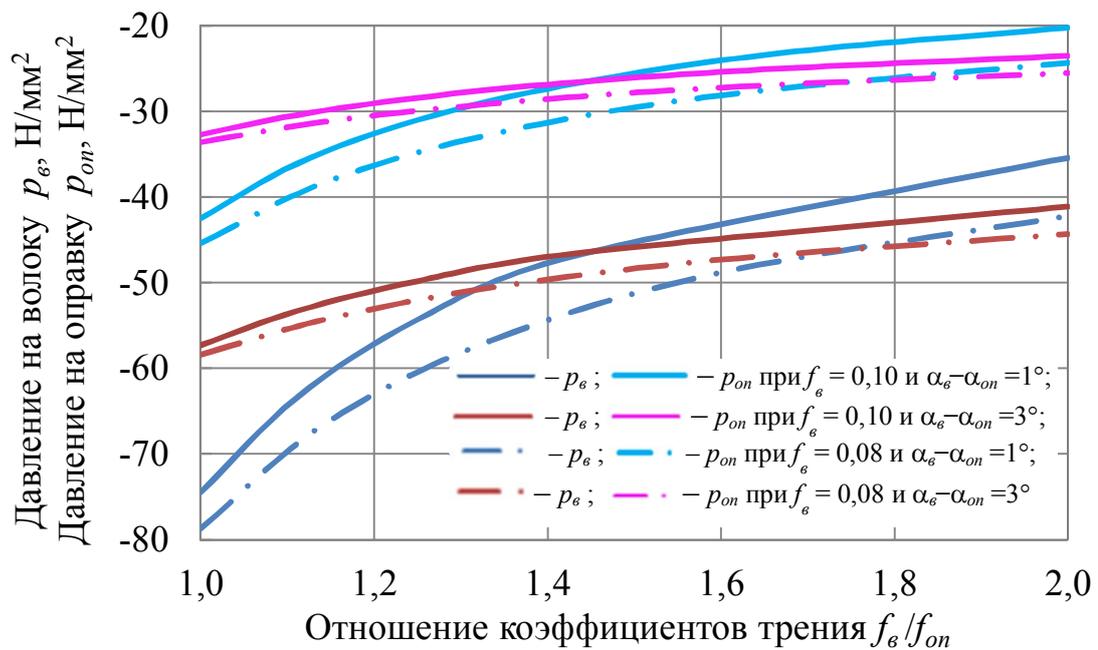


Рисунок 2.18 – Зависимость изменения давлений p_{ϵ} и p_{on} на участке основного обжатия по толщине стенки (узел №5) от отношения коэффициентов трения f_{ϵ}/f_{on} и разности углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on}$

Обобщая результаты численного исследования влияния коэффициента трения на энергосиловые параметры процесса волочения на самоустанавливающейся оправке, сделан вывод, что рациональные граничные условия на контактной поверхности обеспечиваются значениями отношения f_{ϵ}/f_{on} от 1,0 до 1,3.

2.7 Выводы

1. Впервые сформулирована и решена краевая задача механики сплошной среды применительно к процессу волочения на самоустанавливающейся оправке, учитывающая приращение сопротивления металла пластической деформации по длине очага деформации в результате упрочнения. Получена аналитическая зависимость для определения усилия волочения с учетом наиболее значимых факторов.

2. Разработанная математическая модель позволяет осуществлять комплексный анализ напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке с получением достоверных результатов, согласующихся с фундаментальными положениями теории обработки металлов давлением.

Реализация предлагаемого алгоритма решения краевой задачи в одной из численных программ, например Excel или Mathcad, позволяет оперативно проводить как инженерный расчет усилия волочения, так и многофакторное численно-аналитическое исследование влияния условий процесса на напряженное состояние металла трубы.

3. Визуализация распределения по длине очага деформации таких параметров процесса как давления p_e и p_{on} , действующие на технологический инструмент, в виде соответствующих графических зависимостей позволит рационально проектировать маршруты волочения и профилировку волоки и самоустанавливающейся оправки.

4. На основе результатов численного исследования, установлено, что при изменении значений коэффициента трения и разности углов $\alpha_e - \alpha_{on}$ наиболее чувствительным участком очага деформации, с точки зрения напряженного состояния, является участок основного обжатия по толщине стенки, что обусловлено началом контакта оправки с трубой.

5. Установлено, что с целью уменьшения энергосиловых параметров и обеспечения равновесного положения самоустанавливающейся оправки рациональным является осуществление процесса волочения:

- при использовании технологического инструмента со следующими параметрами профилировки: волокна с углом $\alpha_g = 13^\circ$ и самоустанавливающаяся оправка с углом α_{on} от 10° до 12° (т.е. при разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ от 1° до 3°);

- при обеспечении отношения коэффициентов трения на контактной поверхности с волоком и оправкой f_g/f_{on} от 1,0 до 1,3.

6. Для указанных параметров уточнен диапазон допустимого изменения граничных условий на контактной поверхности с волоком и самоустанавливающейся оправкой.

7. При необходимости разработанная математическая модель может быть адаптирована для решения задач другого рода – оптимизационных или динамических, являющихся также актуальными для процессов оправочного волочения.

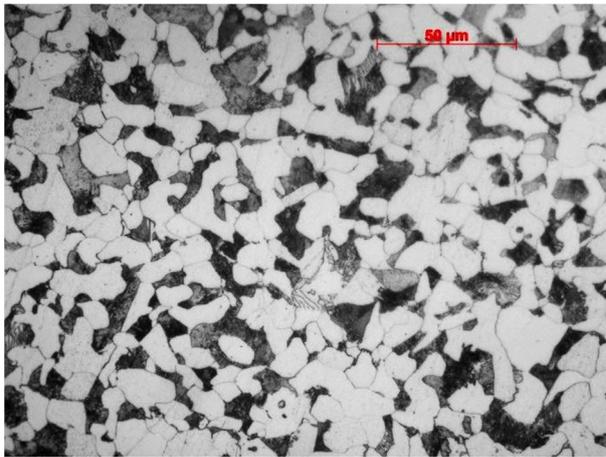
3 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ НА САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕЙСЯ ОПРАВКЕ

Численное исследование напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке с использованием разработанной математической модели показало значимое влияние на стабильность процесса деформации следующих основных параметров: реологические свойства деформируемой марки стали, граничные условия на контактной поверхности трубы с инструментом, профилировка технологического инструмента. С целью подтверждения достоверности выявленных аналитических зависимостей проводился комплекс экспериментальных исследований.

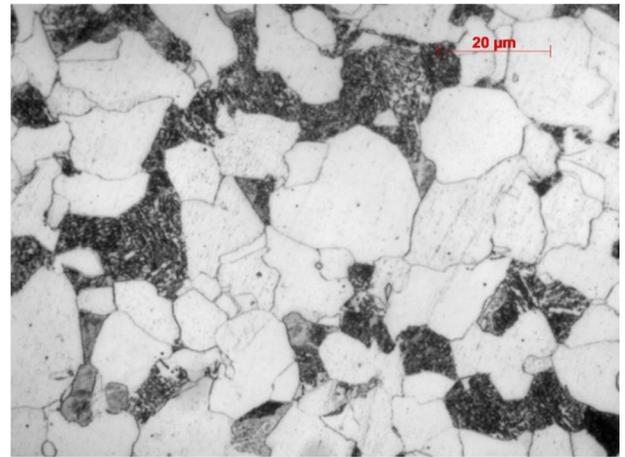
3.1 Исследование сопротивления пластической деформации углеродистой стали

В настоящее время прецизионные холоднодеформированные трубы с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм изготавливают из низкоуглеродистой стали, главным образом марок 10, 20, 30, 35, 45, 30ХГСА, 12Х1МФ. На основе обозначенных в первой главе результатов предварительного анализа имеющейся справочной информации показана необходимость уточнения данных о сопротивлении пластической деформации для стали марок 35 и 12Х1МФ.

Для исследования сопротивления пластической деформации стали марок 35 и 12Х1МФ использовались патрубки размерами 76,0×8,0 мм и 57,0×7,0 мм соответственно. Согласно технологии изготовления холоднодеформированных труб, например в условиях Синарского трубного завода, горячедеформированные трубы из стали марок 35 и 12Х1МФ перед холодной деформацией подвергают термической обработке. Поэтому указанные патрубки длиной 300 мм отбирались от горячедеформированных труб в состоянии после термической обработки (нормализация при температуре нагрева 950 °С с выдержкой 70 мин). Микроструктура стали марок 35 и 12Х1МФ в указанном состоянии представлена на рисунке 3.1.



а



б

Рисунок 3.1 – Микроструктура стали марок: а – 35 (при кратности увеличения 500); б – 12X1МФ (при кратности увеличения 1000)

Для проведения испытаний на статическое растяжение с определением предела текучести от исследуемых патрубков отбирались стандартные цилиндрические образцы по ГОСТ 10006. Испытания проводились в условиях ОАО «РосНИТИ» при комнатной температуре на разрывной машине ССИ MTS Insight 100.

Также от указанных патрубков из стали марок 35 и 12X1МФ в направлении параллельном продольной оси патрубка дополнительно отбирались планки для холодной деформации. Холодная деформация планок реализовывалась на лабораторной экспериментальной установке при использовании модуля с двухвалковой прокатной клетью [118]. Прокатка планок со скоростью 20 м/мин осуществлялась на гладких валках диаметром 260 мм с последовательным увеличением степени деформации. После каждого этапа холодной деформации от каждой из планок отбирались образцы для контроля коэффициента вытяжки и испытаний на статическое растяжение с определением предела текучести.

С целью повышения точности определения фактического коэффициента вытяжки площадь поперечного сечения образцов F_i , мм², рассчитывалась по формуле:

$$F_i = \frac{1000 m_i}{\rho l_i}, \quad (3.1)$$

где m_i – масса образца, г;

l_i – длина образца, мм;

ρ – плотность стали, г/см³.

При этом масса образцов m_i определялась на электронных весах Vibra АН-420 СЕ. Плотность ρ для всех марок стали принималась равной 7,85 г/см³. Коэффициент вытяжки μ_i и степень деформации ε_i , %, определялись по следующим формулам:

$$\mu_i = \frac{F_i}{F_{i+1}}; \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_i = 100 \left(1 - \frac{1}{\mu_i} \right). \quad (3.3)$$

3.1.1 Анализ результатов исследования

В таблице 3.1 приведены результаты экспериментального исследования предела текучести стали марок 35 и 12Х1МФ в состоянии после горячей деформации, в таблице 3.2 – в состоянии после холодной деформации различной степени согласно таблице 3.3.

Таблица 3.1 – Средние значения предела текучести стали марок 35 и 12Х1МФ в состоянии после горячей деформации и последующей термической обработки

Марка стали	Предел текучести σ_m , Н/мм ²
35	312
12Х1МФ	373

Таблица 3.2 – Средние значения предела текучести стали марок 35 и 12Х1МФ в состоянии после холодной деформации различной степени

Марка стали	Степень деформации ε , %	Предел текучести σ_m , Н/мм ²
35	0	312
	11,1	460
	25,4	554
	30,1	581

Продолжение таблицы 3.2

Марка стали	Степень деформации ε , %	Предел текучести σ_m , Н/мм ²
12Х1МФ	0	369
	4,8	520
	9,2	540
	19,0	605
	30,9	617

Для определения сопротивления деформации по формуле (2.1) представленные в таблице 3.3 экспериментальные данные аппроксимировались степенной зависимостью. При этом коэффициенты уравнения регрессии определялись с применением метода наименьших квадратов [110]. Для этого степенная зависимость (2.1) приводилась к линейному виду следующим образом:

$$\ln(\sigma_S - \sigma_{S0}) = \ln a + b \ln \varepsilon, \quad (3.4)$$

или

$$Y_i = B + AX_i, \quad (3.5)$$

где $Y_i = \ln(\sigma_{Si} - \sigma_{S0})$;

$$B = \ln a;$$

$$A = b;$$

$$X_i = \ln \varepsilon_i.$$

Определив Y_i и X_i по фактическим результатам экспериментального исследования (Таблица 3.3), значения искомых коэффициентов A и B определялись путем решения следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^m X_i^2 \right) A + \left(\sum_{i=1}^m X_i \right) B = \sum_{i=1}^m X_i Y_i; \\ \left(\sum_{i=1}^m X_i \right) A + mB = \sum_{i=1}^m Y_i, \end{cases} \quad (3.6)$$

где m – количество аппроксимируемых точек.

Таблица 3.3 – Режимы холодной деформации планок из стали марок 35 и 12Х1МФ

Марка стали	№ образца	Параметры образца до деформации				Параметры образца после деформации					Коэффициент вытяжки	Степень деформации, %
		Толщина, мм	Длина, мм	Масса, г	Площадь сечения, мм ²	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Масса, г	Площадь сечения, мм ²		
35	1	4,98	11,90	3,728	39,908	4,28	8,00	15,09	4,201	35,464	1,125	11,1
	2	5,21	16,03	5,559	44,177	3,45	8,00	15,02	3,885	32,950	1,341	25,4
	3	5,01	14,77	4,486	38,691	2,79	9,00	14,87	3,159	27,063	1,430	30,1
12Х1МФ	1	4,92	17,40	6,293	46,072	4,46	8,00	12,35	4,250	43,838	1,051	4,8
	2	4,92	13,84	4,126	37,977	4,08	7,50	14,66	3,970	34,497	1,101	9,2
	3	4,88	18,45	5,538	38,237	3,41	8,50	16,00	3,890	30,971	1,235	19,0
	4	5,01	14,65	4,031	35,051	2,54	9,00	15,27	2,903	24,218	1,447	30,9

Таким образом, получены уточненные функции изменения сопротивления пластической деформации стали марок 35 и 12Х1МФ. Общий вид и реологические коэффициенты a , b функций $\sigma_S(\varepsilon)$ приведены в таблице 3.4. Полученные результаты также приведены в виде графиков изменения сопротивления пластической деформации от степени деформации на рисунке 3.2.

Таблица 3.4 – Параметры уточненных функций сопротивления пластической деформации стали марок 35 и 12Х1МФ

Марка стали	Функция	Реологические коэффициенты		Коэффициент корреляции R^2
		a	b	
35	$\sigma_S = 312 + 35,1 \varepsilon^{0,597}$	35,1	0,597	0,956
12Х1МФ	$\sigma_S = 373 + 91,3 \varepsilon^{0,294}$	91,3	0,294	0,958

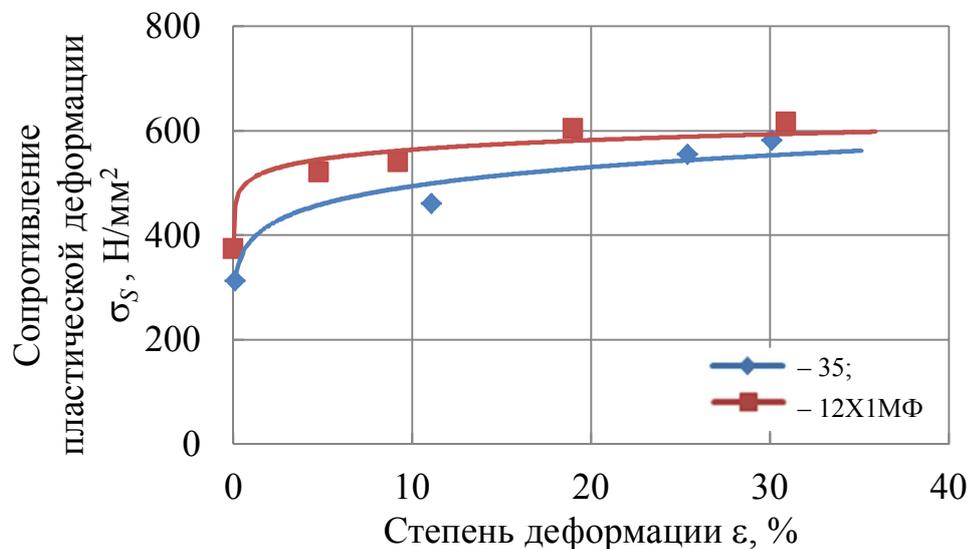


Рисунок 3.2 – Уточненные зависимости изменения сопротивления пластической деформации стали марок 35 и 12Х1МФ от степени деформации

3.2 Исследование вязкости современных смазочных материалов, применяемых при оправочном волочении труб из углеродистой стали

Согласно результатам аналитического обзора, выявлено, что для процесса волочения на самоустанавливающейся оправке важную роль играет вязкость

смазочных материалов. При этом количественные данные о вязкости современных смазочных материалов, применяемых при оправочном волочении, отсутствуют.

Исследование температурной зависимости динамической вязкости осуществлялось для трех жидких смазочных материалов зарубежного производства – Lubra Absolute (Италия), Castrol Iloform (Германия), Dexlube-498 (Венгрия). Смазочные материалы Lubra и Castrol являются смазочно-охлаждающими жидкостями, не требующими нанесения подсмазочного покрытия, хорошо зарекомендовавшие себя в технологии холодной деформации труб. Dexlube-498 относится к реактивному смазочному материалу, не требующему нанесения подсмазочного покрытия, и применяется в действующей технологии оправочного волочения на Синарском трубном заводе [119].

Температурная зависимость динамической вязкости исследуемых смазочных материалов определялась в условиях ОАО «РосНИТИ» по методике, разработанной согласно ГОСТ 9070, с использованием ротационного вискозиметра модели VIS 403 (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Ротационный вискозиметр модели VIS 403

Исследование проводилось в интервале температур от 25 до 240 °С. Максимальная температура испытания определялась как температура разогрева металла трубы в процессе оправочного волочения. Учитывая, что разогрев металла трубы вследствие деформации зависит от степени деформации ε и величины сопротивления пластической деформации σ_s , а также предполагая, что вся работа пластической деформации переходит в тепло, изменение температуры металла трубы Δt , °С, определялось формулой [10]:

$$\Delta t = \frac{1}{c\rho} \int_0^{\varepsilon} \sigma_s(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3.7)$$

где c – теплоемкость стали, Дж/(кг·°С);

ρ – плотность стали, г/см³;

σ_s – сопротивление металла пластической деформации, Н/мм²;

ε – степень деформации, %.

Физические свойства и сопротивление пластической деформации углеродистой стали принимались согласно справочным данным [99] и результатам п.3.2.1. Максимальная степень деформации принималась равной 45,5 %, что соответствует максимальному коэффициенту вытяжки 1,85 – характерному для действующих маршрутов оправочного волочения.

3.2.1 Анализ результатов исследования

Результаты исследования вязкости смазочного материала от температуры приведены на рисунке 3.4.

Согласно представленным на рисунке 3.4 зависимостям качественное отличие исследуемых смазочных материалов друг от друга характерно для интервала температур от 25 до 80 °С. При температуре более 80 °С вязкость исследуемых смазочных материалов сравнима и составляет менее 1 Па·с.

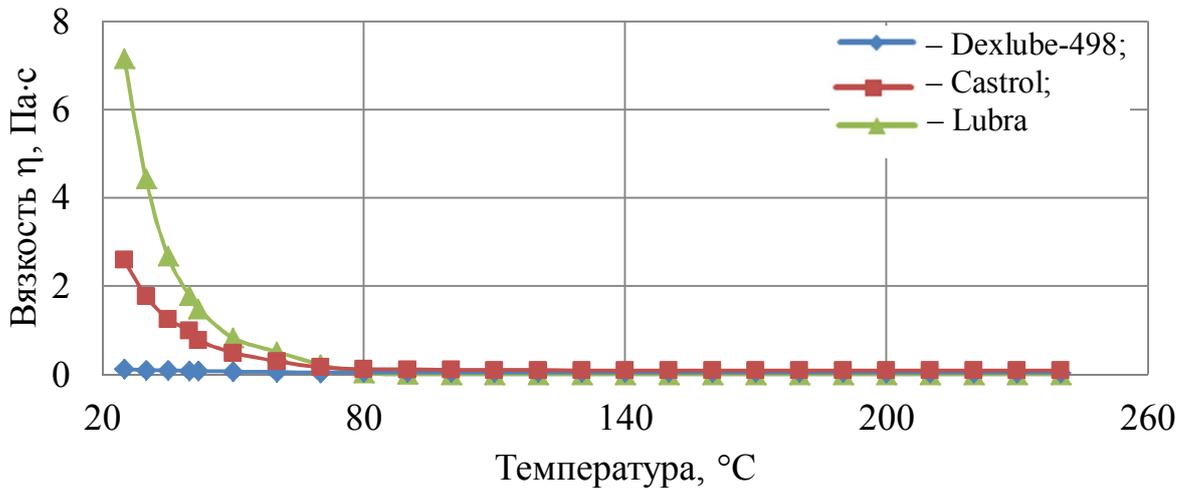


Рисунок 3.4 – Уточненные эмпирические зависимости изменения вязкости исследуемых смазочных материалов в интервале температур от 25 до 240 °С

Аппроксимация результатов исследования изменения вязкости смазочных материалов Lubra, Castrol, Dexlube-498 в зависимости от температуры выполнялась с использованием степенной функций. Для определения коэффициентов уравнения регрессии применялся метод наименьших квадратов по аналогии с п.3.2.1. Полученные таким образом уточненные температурные зависимости изменения динамической вязкости $\eta(t)$ исследуемых смазочных материалов приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры уточненной температурной зависимости изменения динамической вязкости смазочных материалов Lubra, Castrol, Dexlube-498

Смазочный материал	Функция	Эмпирические коэффициенты		Коэффициент корреляции	Вязкость η , Па·с, при 25 °С
		a_η	b_η	R^2	
Lubra	$\eta = 0,22 + 9,1 \cdot 10^4 t^{-2,92}$	$9,1 \cdot 10^4$	-2,92	0,907	7,2
Castrol	$\eta = 0,09 + 2,8 \cdot 10^6 t^{-4,16}$	$2,8 \cdot 10^6$	-4,16	0,853	2,6
Dexlube-498	$\eta = 0,04 + 674 t^{-2,73}$	674	-2,73	0,807	0,1

Примечание – a_η и b_η являются эмпирическими коэффициентами, определяющими интенсивность изменения вязкости смазочного материала от температуры.

Далее в работе исследуемые смазочные материалы обозначены по величине вязкости при температуре 25 °С (Таблица 3.5).

3.3 Экспериментальное исследование влияния смазочного материала на качество труб и стабильность процесса волочения на самоустанавливающейся оправке

Экспериментальное исследование процесса волочения на самоустанавливающейся оправке с использованием смазочных материалов с различной вязкостью реализовывалось на примере изготовления труб размерами $9,0 \times \text{вн}6,0$ мм [120], так как, согласно нормативной документации на трубы рассматриваемого назначения, данный типоразмер характеризуется повышенными требованиями к внутреннему диаметру.

3.3.1 Устройство и технологический инструмент для физического моделирования

Для реализации процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке в лабораторных условиях была спроектирована и изготовлена оригинальная экспериментальная волочильная установка, схема и фотографическое изображение общего вида которой приведены на рисунках 3.5 и 3.6 соответственно.

Установка для волочения включает раму 1 с волокодержателем 2 и тянущее устройство 3 (Рисунок 3.5). Рама 1 представляет собой сварную конструкцию, жестко закрепленную в станине 4 посредством двух болтов 5 и двух поперечен станины 6. Центрирование рамы относительно станины обеспечивается шпонкой 14. Волокодержатель 2, выполненный в виде цилиндрического стакана 7 и плиты 8, крепится к раме 1 посредством четырех шпилек 9. В качестве тянущего устройства 3 использовались вытяжные клещи 10, тросовая система 11 и намоточный барабан 12 диаметром 240 мм, смонтированный на оси, приводимой в движение от двигателя через шестеренную клетку.

С использованием автоматизированной системы управления приводом намоточного барабана имеется возможность задачи скорости вращения барабана с

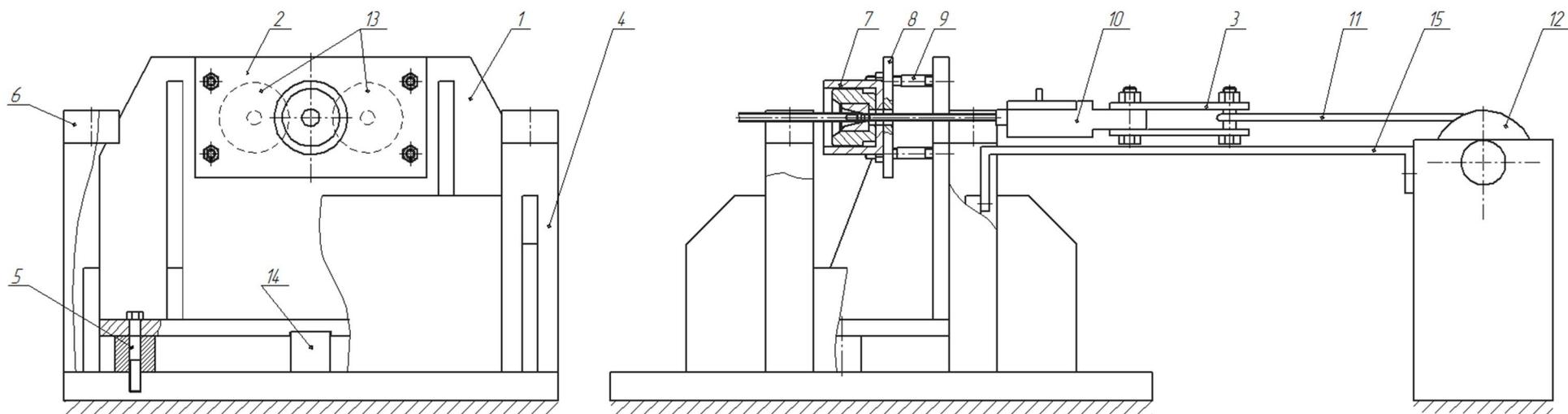
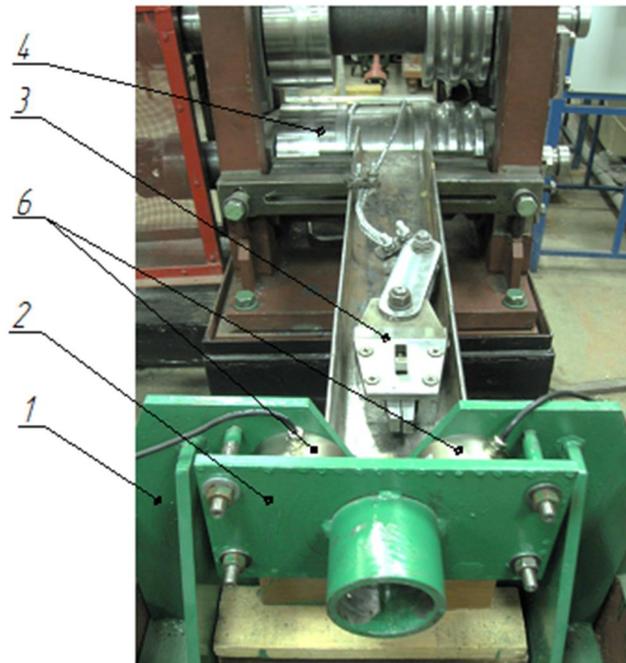


Рисунок 3.5 – Схема экспериментальной установки для физического моделирования процесса волочения:

- 1 – рама; 2 – волокодержатель; 3 – тянущее устройство; 4 – станина; 5 – болт; 6 – поперечины станины; 7 – стакан;
 8 – плита; 9 – шпилька; 10 – клещи вытяжные; 11 – система тросов; 12 – барабан приводной; 13 – датчики силы сжатия;
 14 – шпонка; 15 – направляющая



а



б

Рисунок 3.6 – Фотографическое изображение общего вида экспериментальной волоочильной установки: 1 – рама; 2 – волокодержатель; 3 – тянущее устройство; 4 – барабан приводной; 5 – пульт управления; 6 – датчики силы сжатия

точностью до 1 об/мин и соответственно регулирования скоростного режима волочения. Управление установкой осуществлялось с помощью пульта управления 5 (Рисунок 3.6).

Для замера тягового усилия установка оборудовалась двумя датчиками усилия модели СМ-Т10, которые при заданной скорости вращения барабана в режиме реального времени позволяли фиксировать усилие волочения с точностью до 10 Н. Следует отметить, что в практике экспериментального исследования силовых параметров при волочении известны экспериментальные установки с аналогичным принципом размещения датчиков усилия, например конструкции Всесоюзного института сельскохозяйственного машиностроения [105].

Перед проведением исследовательских работ выполнялось тарирование датчиков усилия с использованием динамометра ДОСМ 3-1.

Система автоматизированного управления экспериментом позволила отслеживать информацию о таких параметрах процесса волочения как скорость вращения барабана, усилие правого и левого датчиков, суммарное усилие на установку. При этом суммарное усилие визуализировалось в виде осциллограмм.

Комплект спроектированного и изготовленного технологического инструмента включал обойму с волокой и самоустанавливающиеся оправки: волока из твердого сплава ВК8 диаметром цилиндрического пояска – 9,0 мм, углом конусности – 13°; оправки из стали марки 70 с дополнительной обработкой рабочих поверхностей до твердости 58-64 единиц HRC_Э. Комплект включал три типа оправок с углами конусности 8°, 9° и 10°, которые выбирались с целью проверки результатов математического моделирования. Длины цилиндрического и конического участков проектных самоустанавливающихся оправок определялись по следующей методике.

Длина цилиндрического участка $l_{ц}$ задавалась не менее некоторой минимальной длины $l_{ц}^{\min}$, мм, определяемой по формуле:

$$l_{ц}^{\min} = l_{к\delta} + l_{кзн}^{\partial\partial}, \quad (3.8)$$

где $l_{к\delta}$ – длина участка калибровки (длина калибрующего пояска волоки), мм;

$l_{кзн}^{\partial o}$ – длина участка дополнительного обжатия в крайнем заднем положении оправки, мм.

Определяя $l_{кзн}^{\partial o}$ по формуле (2.5), при условии, что $k=1,0$, формула (3.8) примет вид:

$$l_{\text{ц}}^{\min} = l_{\text{кд}} + \frac{S_3 \cos\left(\frac{\alpha_{on}}{2}\right) - S_p \cos\left(\alpha_{\epsilon} - \frac{\alpha_{on}}{2}\right)}{\sin \alpha_{\epsilon} \cos\left(\frac{\alpha_{on}}{2}\right)} + S_3 \sin\left(\frac{\alpha_{on}}{2}\right). \quad (3.9)$$

Минимально необходимая длина конического участка самоустанавливающейся оправки $l_{\text{к}}^{\min}$, мм, определялась из анализа геометрии очага деформации в крайнем переднем положении оправки по формуле:

$$l_{\text{к}}^{\min} = \frac{0,5(d_{\text{к}}^{\min} - d_{\text{ц}})}{\text{tg } \alpha_{on}}. \quad (3.10)$$

При этом диаметр конуса оправки $d_{\text{к}}^{\min}$ в сечении начала контакта внутренней поверхности трубы с оправкой определялся с использованием формулы (2.13).

Рассчитанные по формулам (3.9) и (3.10) длины округлялись до целого числа или кратного 0,5, и увеличивались на 2-3 мм для гарантированного обеспечения контакта трубы с оправкой. Таким образом, в общем виде конструкция самоустанавливающихся оправок включала переднюю фаску, рабочий цилиндрический участок, рабочий конический участок, бочку и хвостовик (Рисунок 3.7). При этом рабочий цилиндрический участок выполнялся с конусностью от 1° до 2° . Параметры профилировки приведены в таблице 3.6 в соответствии с обозначениями на рисунке 3.7.

Перемещение самоустанавливающейся оправки в полости трубы до основания головки осуществлялось посредством стержня.

Формирование головок на трубных заготовках выполнялось на ротационно-ковочной машине модели В-242 способом холодной деформации с целью сохранения внутренней полости головки.

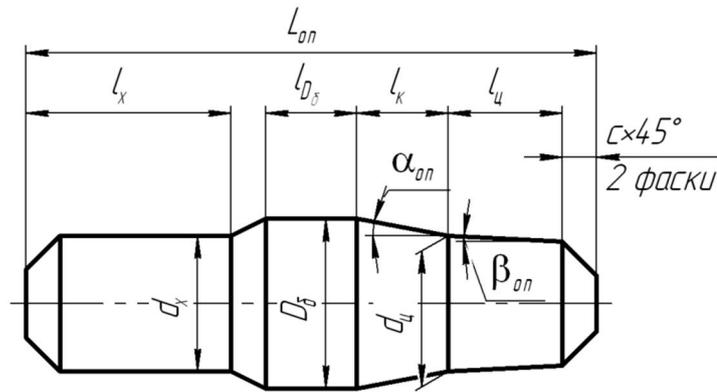


Рисунок 3.7 – Конструкция и профилировка проектных самоустанавливающихся оправок: α_{on} , β_{on} – углы наклона образующих конусного и цилиндрического участков соответственно; l_k , $l_ц$ – длины конусного и цилиндрического участков соответственно; $l_{Dб}$, l_x – длины бочки и хвостовика соответственно; L_{on} – длина оправки; c – фаска; $d_ц$, $D_б$, d_x – диаметры цилиндра, бочки и хвостовика соответственно

Таблица 3.6 – Параметры профилировки проектных самоустанавливающихся оправок для экспериментального исследования

d , мм	№ оправки	α_{on} , град	$\alpha_в - \alpha_{on}$, град	β_{on} , град	$D_б$, мм	d_x , мм	$l_ц$, мм	l_k , мм	$l_{Dб}$, мм	l_x , мм	L_{on} , мм	c , мм
6,0	1	8	5	1-2	7,08	6,0	5,0	4,0	4,0	14,0	30,0	1,5
	2	9	4		7,28			4,0	4,0			
	3	10	3		7,56			4,5	3,5			

Инструментальный контроль параметров формоизменения труб и параметров технологического инструмента проводился с использованием штангенциркуля с цифровым отсчётным устройством ШЦС-128 и пределом допускаемой погрешности $\pm 0,01$ мм. Инструментальный контроль шероховатости поверхности образцов труб выполнялся с использованием профилометра SurfTest SJ-201 по параметру среднего арифметического отклонения профиля при базовой длине 2,5 мм.

3.3.2 Проектирование экспериментальных маршрутов волочения на самоустанавливающейся оправке

В качестве основных рекомендаций для проектирования режимов волочения на самоустанавливающейся оправке принимались следующие [10, 25, 27, 29, 102]: абсолютная деформация по наружному диаметру не более 4,0 мм, по толщине стенке – от 0,1 до 0,2 мм; коэффициент вытяжки – не менее 1,3. С использованием данных рекомендаций и разработанной математической модели выполнялась предварительная проработка технологических маршрутов волочения труб из стали 10. При этом коэффициент вытяжки варьировался в диапазоне значений от 1,40 до 1,55.

Согласно результатам предварительного математического моделирования (Рисунок 3.8) показано, что с увеличением коэффициента вытяжки меньшие усилия волочения при прочих равных условиях (в том числе при $f_{on} = f_e = 0,05$) наблюдаются при использовании оправки №3, т.е. разности углов $\alpha_e - \alpha_{on} = 3^\circ$ (Таблица 3.6).

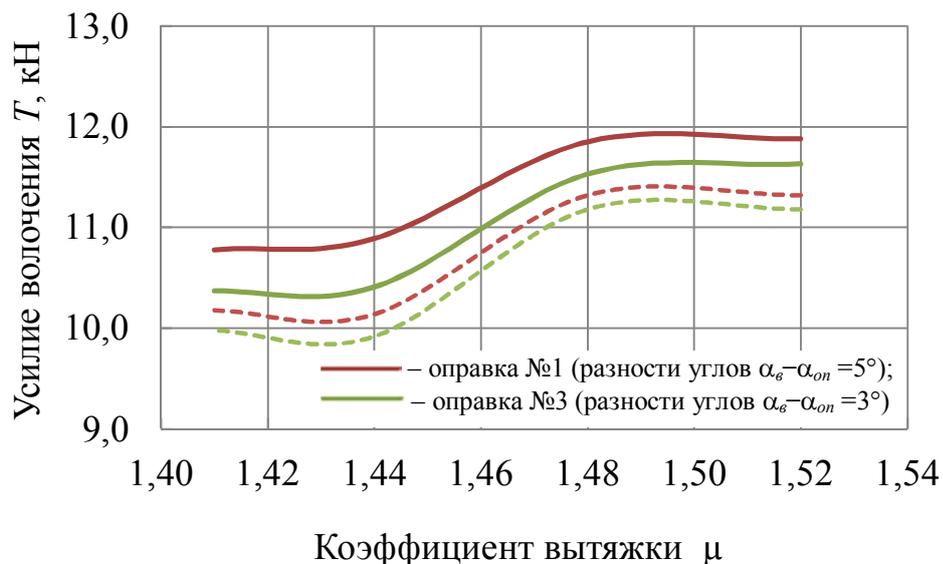


Рисунок 3.8 – Зависимость изменения расчетных усилий волочения от коэффициента вытяжки в положении самоустанавливающейся оправки:

- – близком к крайнему заднему положению;
- – близком к крайнему переднему положению

Также выявлено, что с уменьшением коэффициента вытяжки и увеличением при этом угла конусности оправки вероятность, что оправка займет равновесное положение в очаге деформации, уменьшается ввиду уменьшения допускаемой длины ее осевых перемещений (Рисунок 3.9). Соответственно, малейшее отклонение от равновесия (например, ввиду неравномерности условий трения, толщины стенки или механических свойств металла по длине трубы), что зачастую характерно для реального процесса волочения, может привести к браку и увеличению простоев. С другой стороны, при обеспечении устойчивых условий равновесия, например за счет использования эффективной смазки, меньшая длина осевых перемещений гарантирует большую точность труб по внутреннему диаметру.

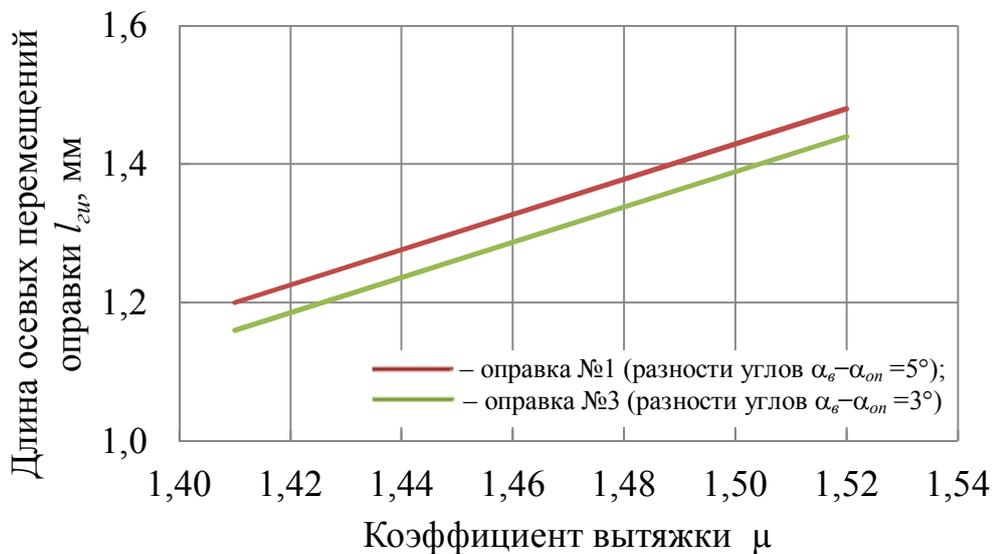


Рисунок 3.9 – Зависимость изменения осевых перемещений оправки в очаге деформации от коэффициента вытяжки

Таким образом, предварительное математическое моделирование показало, что более благоприятным условием для обеспечения стабильного волочения является осуществление деформации с коэффициентом вытяжки 1,5 при использовании оправки №3. С целью проверки результатов математического моделирования и оценки влияния вязкости технологических смазок на эффективность процесса волочения экспериментальное опробование проводилось по двум маршрутам, представленным в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Технологические маршруты и режимы экспериментального исследования волочения труб на самоустанавливающейся оправке

№ маршрута	Размеры труб, мм	Абсолютная деформация, мм		Коэффициент вытяжки, μ	Относительная деформация, ε , %	Коэффициенты деформации	
		по диаметру	по толщине стенки			по диаметру	по толщине стенки
1	11,0×1,7 → 9,0×вн6,0	2,00	0,20	1,41	28,8	1,24	1,13
2	11,5×1,75 → 9,0×вн6,0	2,50	0,25	1,52	34,0	1,30	1,17

3.3.3 Порядок проведения экспериментального волочения

Экспериментальное волочение осуществлялось с использованием трубных заготовок размерами 11,0×1,70 мм, 11,5×1,75 мм и длиной 1,5 м в количестве 15 шт. каждого типоразмера. С целью контроля геометрических размеров и шероховатости внутренней поверхности от каждого типоразмера трубных заготовок отбиралось по три образца длиной от 200 до 250 мм. Полученные с привлечением статистических методов обработки [121] результаты контроля приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Фактические размеры и шероховатость внутренней поверхности трубных заготовок номинальными размерами 11,0×1,70 мм и 11,5×1,75 мм

Номинальные размеры, мм	Фактические средние значения, мм		Среднее значение шероховатости внутренней поверхности, мкм
	наружного диаметра	толщины стенки	
11,0×1,70	10,95±0,01	1,71±0,02	1,87
11,5×1,75	11,53±0,01	1,73±0,02	1,84

После формирования головок на поверхность трубных заготовок наносился смазочный материал. Согласно технологии нанесения смазки с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с, трубные заготовки погружались в емкость со смазкой, нагретой до температуры от 60 до 70 °С, выдерживались в течение 20 мин. При этом через

5 мин после начала обработки трубные заготовки извлекались, обеспечивалось стекание смазки в течение 1 мин, после чего заготовки повторно погружались в емкость еще на 15 мин.

Нанесение на наружную и внутреннюю поверхность трубных заготовок смазочных материалов с вязкостью $\eta=2,6$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с осуществлялось вручную.

Затем в полость трубных заготовок задавалась самоустанавливающаяся оправка. После установки оправки трубная заготовка задавалась в волоку, захватывалась вытяжными клещами за головку и осуществлялось волочение.

На первом этапе исследования скорость вращения барабана тянущего устройства задавалась равной 3 об/мин, обеспечивая, таким образом, скорость волочения 2,3 м/мин. Данный скоростной режим выбирался по рекомендациям, представленным в работе [25], с целью получения реального характера изменения усилия волочения в момент вовлечения оправки в очаг деформации. На втором этапе скорость волочения после начала работы оправки увеличивалась до 20 м/мин.

После каждого прохода волочения осуществлялся визуальный осмотр поверхности оправок с целью выявления следов износа.

Для контроля фактических размеров и оценки качества внутренней поверхности от каждой трубы отбирался образец длиной не менее 250 мм.

Анализ результатов экспериментального исследования процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке проводился в два этапа по следующим критериям: стабильность процесса волочения, силовые параметры, качество труб. На первом этапе исследовалось влияние профилировки самоустанавливающихся оправок и вязкости смазочных материалов на стабильность процесса волочения и его силовые параметры. На втором этапе выполнялся анализ качественных характеристик труб.

3.3.4 Анализ результатов экспериментального волочения

3.3.4.1 Влияние профилировки самоустанавливающейся оправки и вязкости смазочного материала на стабильность процесса волочения

В ходе экспериментального волочения по маршруту №1, с использованием самоустанавливающихся оправок №1 (разность углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 5^\circ$) и №2 (разность углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 4^\circ$) и смазочного материала с вязкостью $\eta = 2,6$ Па·с наблюдалось нарушение условий работы оправки. Оправка затягивалась в очаг деформации, выходя за крайнее переднее положение, проходила через калибрующий поясок волокни. Волочение оставшегося участка трубы осуществлялось безоправочно.

При волочении по маршруту №2 с использованием оправки №3 (разность углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$) на той же смазке наблюдалось оправочное волочение, при этом в ряде случаев наблюдались обрывы, сопровождавшиеся плотным охватом части конуса оправки. Анализ характера места обрыва показал заметное утонение стенки трубы. Очевидно, что в момент контакта трубы с оправкой напряжение волочения достигло значений, соизмеримых с сопротивлением деформации. В результате чего схема напряженного состояния представляла собой одноосное растяжение, чем и объясняется образование «шейки» и обрыв.

Затягивание оправки за очаг деформации при использовании оправок №1 и №2 обусловлено превышением сил, действующих на цилиндре оправке, над силами, действующими на конусный участок оправки. С целью исключения этих нарушений необходимо увеличивать угол конусности оправки. На основании данных результатов сделан вывод, что для волокни с углом $\alpha_g = 13^\circ$ рациональной является профилировка самоустанавливающейся оправки с углами α_{on} более 10° .

На основе данных выводов дальнейшее исследование осуществлялось при волочении труб по маршруту №2 с использованием оправки №3. Характер оправочного волочения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta = 7,2$ Па·с оказался схож с результатами при волочении на смазочном материале

с вязкостью $\eta=2,6$ Па·с: на одной из трубных заготовок наблюдался обрыв ближе к концу процесса деформации. Данный факт свидетельствует о выдавливании смазочного материала из очага деформации.

Волочение всего объема труб с использованием смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с проходило без каких-либо нарушений. Процесс деформации был стабильным, плавным. По окончании волочения рабочий цилиндр оправки был неплотно зажат задним концом трубы, поэтому извлечение самоустанавливающейся оправки не вызвало затруднений.

3.3.4.2 Влияние профилировки самоустанавливающейся оправки и вязкости смазочного материала на силовые параметры процесса волочения

Средние арифметические значения усилия волочения в установившемся режиме процесса волочения труб по маршруту $11,5 \times 1,75$ мм \rightarrow $9,0 \times \text{вн}6,0$ мм (№2) на скорости 20 м/мин при использовании инструмента, обеспечивающего разность углов $\alpha_e - \alpha_{on} = 3^\circ$ (оправка №3), и исследуемых смазочных материалов приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Средние арифметические значения усилий установившегося процесса волочения труб по маршруту $11,5 \times 1,75$ мм \rightarrow $9,0 \times \text{вн}6,0$ мм (№2) при использовании инструмента, обеспечивающего разность углов $\alpha_e - \alpha_{on} = 3^\circ$ (оправка №3) и смазочных материалов различной вязкости

Вязкость η , Па·с	Усилие волочения \bar{T} , кН
0,1	12,1
2,6	14,3
7,2	14,5

Результаты сравнительного анализа силовых параметров согласуются с приведенными ранее данными: минимальные значения тянущего усилия зафиксированы для смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с – среднее значение составило 12,1 кН.

Анализ характера изменения усилия в процессе волочения труб при разности углов $\alpha_e - \alpha_{on} = 3^\circ$ (оправка №3) выполнялся на примере случаев волочения с минимально зафиксированными усилиями на скорости 2,3 м/мин. Осциллограммы указанных случаев волочения представлены на рисунке 3.10.

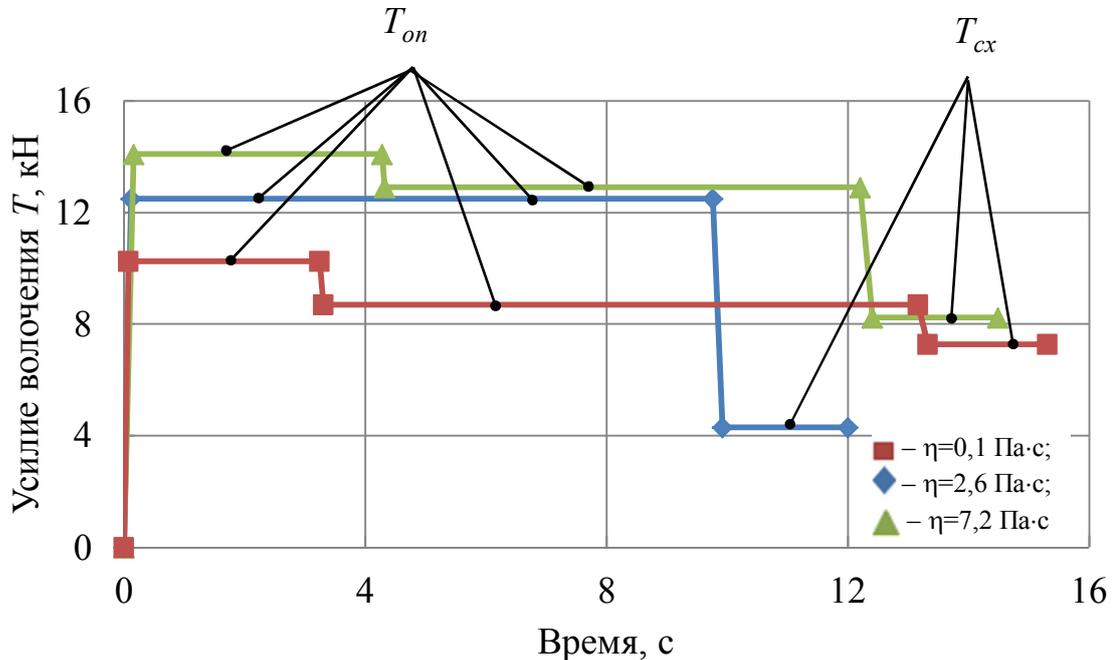


Рисунок 3.10 – Осциллограммы изменения усилия волочения при разности углов $\alpha_e - \alpha_{on} = 3^\circ$ (оправка №3) и использовании смазочных материалов различной вязкости: T_{on} – усилие оправочного волочения; $T_{сх}$ – усилие схода трубы с оправки

Согласно осциллограммам на рисунке 3.10 для смазочных материалов с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с в начале волочения наблюдается пик, обусловленный затягиваем оправки в положение близкое к крайнему переднему. При использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=2,6$ Па·с оправка сразу занимает равновесное положение. Следует отметить, что помимо трибологических характеристик смазочных материалов на вид осциллограмм в начальный момент волочения могло оказать влияние исходное положение оправки, определяемое операцией задачи оправки. Отсутствие возможности

контроля режимов осуществления операции задачи также способствует затягиванию оправки за крайнее переднее положение.

Уменьшение усилия установившегося процесса до усилия схода трубы с оправки T_{cx} в каждом из рассматриваемых случаев обусловлено отсутствием растягивающих напряжений на недеформированном конце трубной заготовки.

На основании положительного результата использования смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с, для сравнительной оценки также были протянуты трубы на оправке №2 (разность углов $\alpha_e - \alpha_{on}=4^\circ$). Осциллограммы минимально зафиксированных усилий при волочении на оправках №2 и №3 приведены на рисунке 3.11.

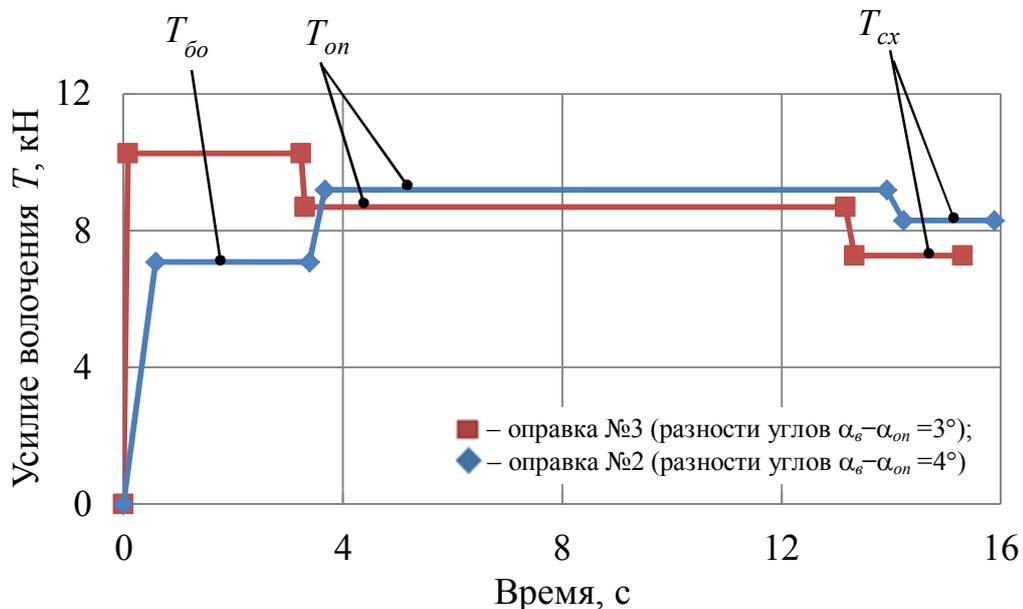


Рисунок 3.11 – Осциллограммы изменения усилия волочения при разности углов $\alpha_e - \alpha_{on}=4^\circ$ (оправка №2) и $\alpha_e - \alpha_{on}=3^\circ$ (оправка №3) и использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с: $T_{\text{бо}}$ – усилие волочения в безоправочном режиме;

$T_{\text{он}}$ – усилие оправочного волочения; $T_{\text{сх}}$ – усилие схода трубы с оправки

Согласно осциллограммам на рисунке 3.11, волочение при разности углов $\alpha_e - \alpha_{on}=4^\circ$ (оправка №2) на начальном этапе сопровождалось наличием участка безоправочного волочения и несколько большим усилием волочения в

установившемся режиме оправочного волочения. Волочение при разности углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$ (оправка №3) уже на начальном этапе осуществлялось в оправочном режиме при положении оправки ближе к крайнему переднему – поэтому усилие в этом случае максимальное. После чего действие втягивающих и выталкивающих сил становится соизмеримым и оправка занимает равновесное положение в очаге деформации, что сопровождается уменьшением усилия. Следует отметить, что характер экспериментальных осциллограмм качественно согласуется с имеющейся информацией в работе [25].

Таким образом, выявлено, что при прочих равных условиях, использование смазочного материала с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с позволяет реализовать процесс волочения труб на самоустанавливающейся оправке с минимальными усилиями.

3.3.4.3 Влияние профилировки самоустанавливающейся оправки и вязкости смазочного материала на качество труб

На рисунке 3.12 приведены фотографические изображения внутренней поверхности образцов, отобранных от труб тянутых по маршруту $11,5 \times 1,75$ мм \rightarrow $9,0 \times \text{вн}6,0$ мм на самоустанавливающейся оправке №3 (разность углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$) с использованием смазочных материалов с вязкостью $\eta = 2,6$ Па·с и $\eta = 0,1$ Па·с.

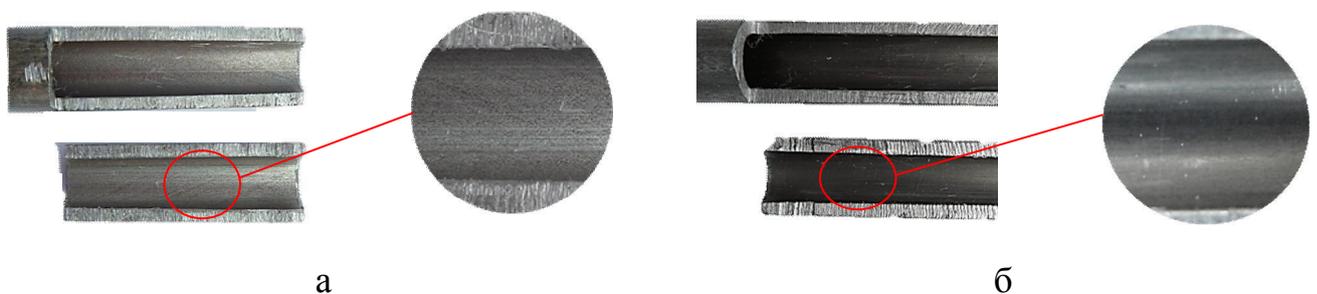


Рисунок 3.12 – Фотографические изображения внутренней поверхности образцов труб, протянутых при использовании смазочного материала с вязкостью: а – $\eta = 0,1$ Па·с; б – $\eta = 2,6$ Па·с

Визуальный осмотр внутренней поверхности исследуемых образцов, показал, что более ровной по текстуре является внутренняя поверхность труб, полученных с использованием смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с. Для труб, протянутых с использованием смазочного материала с вязкостью $\eta=2,6$ Па·с, характерным является наличие светлых продольных полос. Светлые продольные полосы представляют собой участки, где количество смазочного материала было минимальным, что говорит о наличии явления вытеснения его из очага деформации.

Инструментальный контроль качества поверхности исследуемых образцов труб выполнялся путем оценки шероховатости внутренней поверхности с использованием профилометра SurfTest SJ-201. Результаты измерения параметра подтвердили выводы, сделанные при визуальном осмотре. Минимальные значения шероховатости поверхности зафиксированы на образцах труб, тянутых с использованием смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с: среднее значение шероховатости составило $\overline{R_{a1}^{BH}}=0,43$ мкм. Для труб, тянутых на смазочных материалах с вязкостью $\eta=2,6$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с, наблюдались несколько большие значения: соответственно $\overline{R_{a1}^{BH}}=0,50$ мкм и $\overline{R_{a1}^{BH}}=0,55$ мкм. Следует отметить, что во всех случаях оправочного волочения качество внутренней поверхности труб в сравнении с исходной заготовкой было улучшено: шероховатость внутренней поверхности труб внутренним диаметром 6,0 мм уменьшилась в среднем в 4 раза.

Инструментальный контроль внутреннего диаметра труб готовых размеров показал, что в процессе волочения по маршруту №2 при разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}=3^\circ$ (оправка №3) независимо от применяемого смазочного материала получен внутренний диаметр в диапазоне от 6,0 до 6,072 мм (Таблица 3.10), что удовлетворяет требованиям ГОСТ 9567, а также DIN EN 10305-1.

Данный факт позволяет сделать вывод, что опробованные режимы деформации с коэффициентом вытяжки 1,50–1,55 и профилировка инструмента, обеспечиваемая разность углов $\alpha_g - \alpha_{on}=3^\circ$, являются корректными.

При этом для обеспечения наиболее жестких требований к внутреннему диаметру необходимо уточнить предельные отклонения размеров цилиндрического рабочего участка самоустанавливающейся оправки.

Таблица 3.10 – Средние арифметические значения наружного и внутреннего диаметров и шероховатости внутренней поверхности труб номинальными размерами 9,0×вн6,0 мм

Вязкость η , Па·с	Размеры труб, мм		Фактический коэффициент вытяжки μ_ϕ	Фактическая степень деформации ε_ϕ , %	Шероховатость внутренней поверхности $\overline{R_a^{вн}}$, мкм
	Наружный диаметр	Внутренний диаметр			
0,1	8,94±0,016	6,05±0,022	1,55	35,5	0,43
2,6	8,93±0,012	6,05±0,018	1,56	35,8	0,55
7,2	8,93±0,014	6,05±0,021	1,56	35,8	0,50

3.3.4.4 Влияние вязкости смазочного материала на положение оправки в очаге деформации

Согласно представленным результатам экспериментального волочения выявлено, что оправка занимала в очаге деформации положение близкое к крайнему переднему. При этом с увеличением разности углов $\alpha_\varepsilon - \alpha_{on}$ вероятность затягивания оправки за крайнее переднее положение увеличивалась. Данная тенденция характерна и в случае увеличения вязкости смазочного материала.

С использованием формулы (3.7) для случая волочения труб по маршруту №2 при разности углов $\alpha_\varepsilon - \alpha_{on} = 3^\circ$, при условии, что оправка занимает положение в очаге деформации близкое к крайнему переднему, получена зависимость изменения степени деформации от температуры деформационного разогрева $\varepsilon(t)$ по длине очага (Рисунок 3.13). Также на рисунке 3.13 приведены температурные зависимости динамической вязкости исследуемых смазочных материалов. Сопоставляя указанные зависимости, сделан следующий вывод. К моменту начала контакта трубы с оправкой вязкость исследуемых смазочных материалов уменьшается ввиду деформационного разогрева на участке редуцирования.

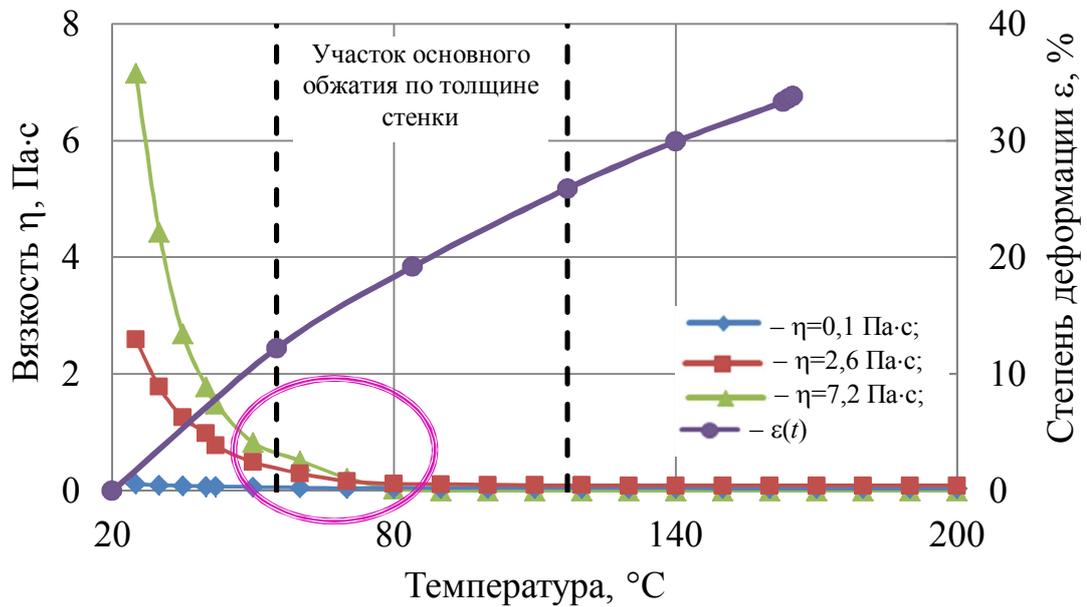


Рисунок 3.13 – Расчетная температурная зависимость изменения степени деформации и эмпирическая температурная зависимость вязкости исследуемых смазочных материалов по длине очага деформации

В период деформации на конусе оправки интенсивность изменения вязкости исследуемых смазочных материалов еще различна. В то время как для остальных участков деформации на оправке вязкость исследуемых смазочных материалов соизмерима и постоянна по величине.

Таким образом, именно различие трибологических характеристик исследуемых смазочных материалов на участке начала контакта трубы с оправкой оказывает определяющее влияние на вовлечение ее в очаг деформации и достижение требуемых условий равновесия. Этот факт подтверждает нестабильность работы оправки при использовании смазочных материалов с вязкостью $\eta=2,6$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с в процессе экспериментального исследования. Кроме того можно сделать вывод, что чем меньше влияние температурного фактора на трибологические параметры смазочных материалов, тем стабильнее работа самоустанавливающейся оправки.

3.4 Определение коэффициента трения скольжения при волочении с использованием современных смазочных материалов

Для окончательного подтверждения сделанных выводов необходимо оценить влияние вязкости смазочного материала на величину коэффициента трения. Для объяснения влияния вязкости смазочного материала на силовые параметры волочения в процессе экспериментального исследования, а также для повышения качества расчетов по разработанной математической модели необходимо знать величину коэффициента трения.

3.4.1 Установка и инструмент для физического моделирования

Коэффициент трения определялся путем моделирования процесса трения скольжения на специальном трибометре (Рисунок 3.14), модернизированном для решения поставленной задачи. Элементом трибосопряжения используемого трибометра является пара «диск-палец» (Рисунок 3.15)

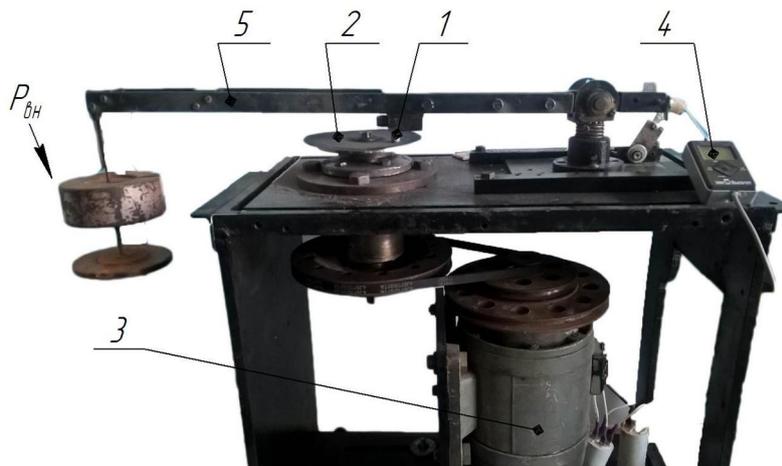


Рисунок 3.14 – Трибометр: 1 – палец; 2 – диск;
3 – привод; 4 – датчик; 5 – рычаг



Рисунок 3.15 – Зона контакта пары трения «диск-палец»

Трибометр включает шарнирно закрепленный рычаг 5 и вращающийся с постоянной скоростью диск 2 диаметром $2R$ с приводом от электродвигателя 3.

Со стороны большей консоли рычага закреплялся цилиндрический палец 1. Со стороны меньшей консоли устанавливался тензометрический датчик 4.

Принцип работы трибометра заключается в следующем (Рисунок 3.14): в начальный момент приложения внешней нагрузки $P_{вн}$ палец 1 начинает контактировать с вращающимся диском 2, изменяя подводимый со стороны привода 3 крутящий момент M_{∂} . На контактной поверхности возникают силы трения $F_{тр}$ и соответственно крутящий момент $M_{тр}$.

Расчетная схема рассматриваемой механической системы приведена на рисунке 3.16.

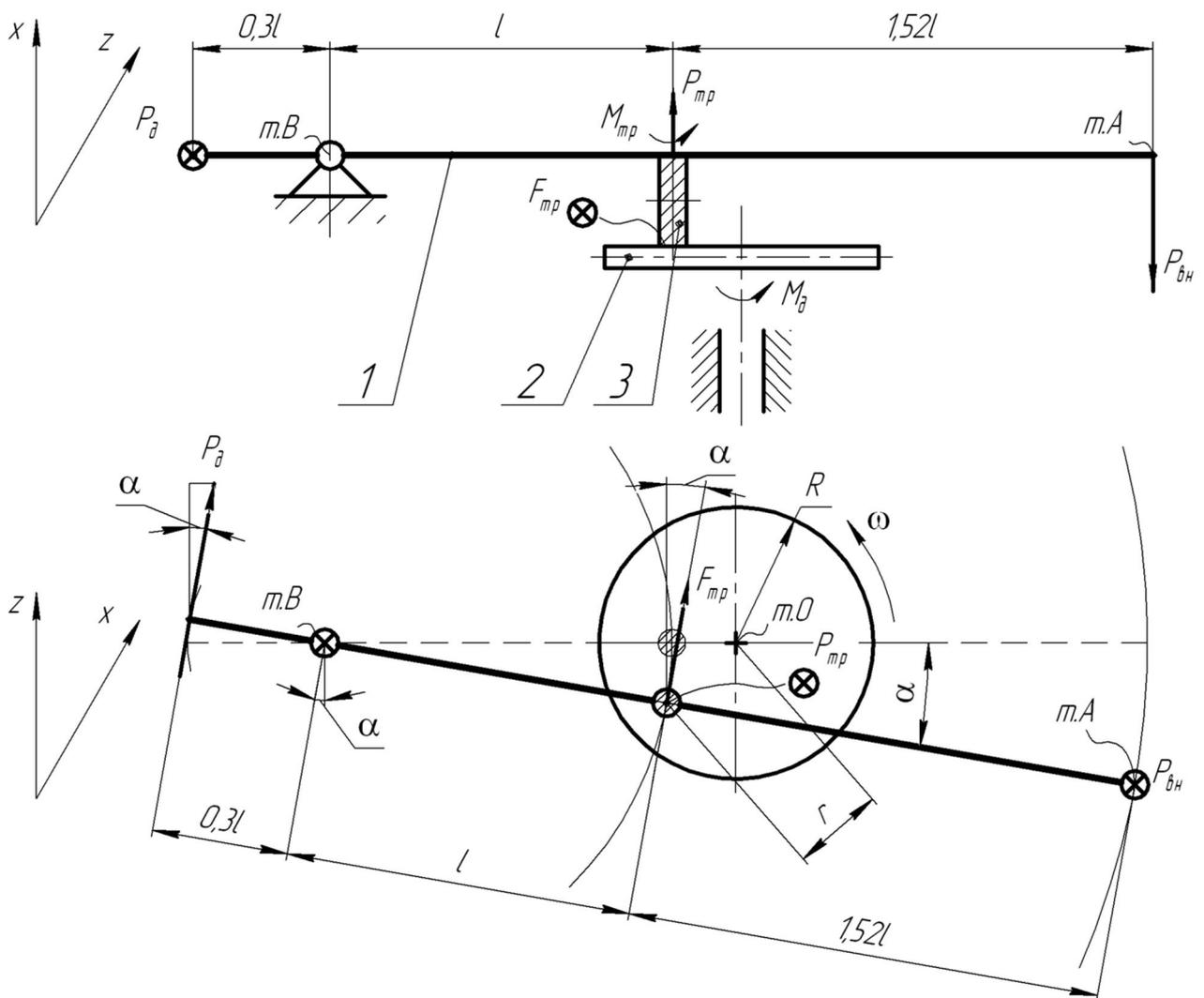


Рисунок 3.16 – Расчетная схема механической трибосистемы «палец – диск»

В основу методики расчета коэффициента трения f применительно к рассматриваемой механической системе (Рисунок 3.16) заложена зависимость [122]:

$$f = \frac{M_{mp}}{P_{mp} r}. \quad (3.14)$$

где M_{mp} – момент, создаваемый силой трения, Н·м;

P_{mp} – усилие прижатия пальца к диску, Н;

r – радиус до точки приложения усилия P_{mp} , м.

Сила прижатия пальца к диску P_{mp} , Н, определялась в процессе тарировки в зависимости от прилагаемой нагрузки $P_{вн}$. В результате получена эмпирическая зависимость следующего вида:

$$P_{mp} = 2,53 P_{вн} + 21,2. \quad (3.16)$$

Крутящий момент M_{mp} определялся по формуле:

$$M_{mp} = F_{mp} r, \quad (3.17)$$

где F_{mp} – сила трения, Н.

Для определения силы F_{mp} использовалось условие равновесия моментов сил относительно точки В (Рисунок 3.16). В результате сила F_{mp} определялась по формуле:

$$F_{mp} = 0,3 P_{\delta}, \quad (3.18)$$

где P_{δ} – усилие отклонения рычага трибометра, определяемое с помощью тензометрического датчика 4 (Рисунок 3.14), Н

Таким образом, формула (3.14) приводилась к следующему виду:

$$f = \frac{F_{mp}}{P_{mp}} = \frac{0,3 P_{\delta}}{2,53 P_{вн} + 21,2}. \quad (3.19)$$

3.4.2 Адаптация трибометра для определения коэффициента трения в процессе волочения

Особенностью использования трибометров является необходимость в предварительном математико-физическом моделировании, позволяющем на малогабаритных образцах лабораторного трибометра воспроизводить условия трения, характерные в частности для волочения [123]. Данный способ моделирования основан на применении теории подобия, результатом которой являются аналитически полученные масштабные коэффициенты перехода от модели к натуре. Коэффициенты подобия используют для распространения на реальные производственные условия закономерностей и количественных данных, полученных на трибометре [123, 124].

В качестве основного принимался геометрический принцип подобия, определяемый по следующей формуле [124, 125]:

$$\frac{F_1}{F_{обр}} = k_n^2, \quad (3.20)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения трубы на выходе из очага деформации, мм²;

$F_{обр}$ – площадь контактной поверхности пальца с диском, мм²;

k_n – безразмерный коэффициент, зависящий от относительных размеров, формы тел и условий их контактного трения.

Полагая, что в большей степени на напряжение волочения оказывает влияние сопротивление пластической деформации, отношение $\frac{T}{F_1}$, Н/мм², представлялось в следующем виде [125]:

$$\frac{T}{F_1} = k_n \sigma_S, \quad (3.21)$$

где T – экспериментальное усилие волочения, Н;

σ_S – сопротивление пластической деформации, Н/мм².

С использованием формулы (3.21) для опробованных режимов волочения труб на самоустанавливающейся оправке (Таблицы 3.10, 3.11) определялся коэффициент k_n . Для указанных условий он принимает значения от 0,62 до 0,75. Тогда, согласно формуле (3.20), диаметр пальца должен соответствовать значениям от 9,0 до 10,8 мм.

Также, для качественного транспонирования результатов трибометрического эксперимента на реальный процесс волочения должна быть обеспечена соизмеримость скоростного режима, величин шероховатости контактных поверхностей и соответствие условий трения.

Соизмеримость скоростей обеспечивалась путем задания частоты вращения диска. Для приближения к линейным скоростям экспериментального волочения частота вращения диска задавалась равной 250 об/мин.

Соизмеримость величин шероховатости поверхностей волочильного инструмента с шероховатостью инструмента трибометра обеспечивалась путем полирования рабочих поверхностей диска трибометра до значений шероховатости $R_a = 0,32$ мкм. Контроль шероховатости рабочих поверхностей инструмента осуществлялся с использованием профилометра Surftest SJ-201.

Соответствие условий трения между контактными поверхностями обеспечивалось путём использования тех же смазочных материалов, что и при экспериментальном волочении. Учитывая, что смазочные материалы с вязкостью $\eta=2,6$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с показали соизмеримые усилия волочения, исследование по определению коэффициента трения скольжения осуществлялось с использованием смазочных материалов с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с.

С учетом технических возможностей трибометра экспериментальное исследование проводилось при постоянной внешней нагрузке $P_{вн}$ равной 14,7 Н.

3.4.3 Алгоритм трибометрического исследования

Экспериментальное определение коэффициента трения скольжения проводилось по следующему алгоритму:

1. Подготовка трибометра: настройка тензодатчика.
2. Подготовка технологического инструмента:
 - обезжиривание рабочих поверхностей диска и пальца;
 - нанесение смазочных материалов согласно представленной ранее технологии (п.3.3.3).
3. Монтаж диска и пальца на трибометр.
4. Приложение внешней нагрузки $P_{вн} = 14,7$ Н к консоли трибометра.
5. Включение привода вращения диска. Фиксация значений усилия P_0 .
6. Расчет коэффициента трения f по формуле (3.19).

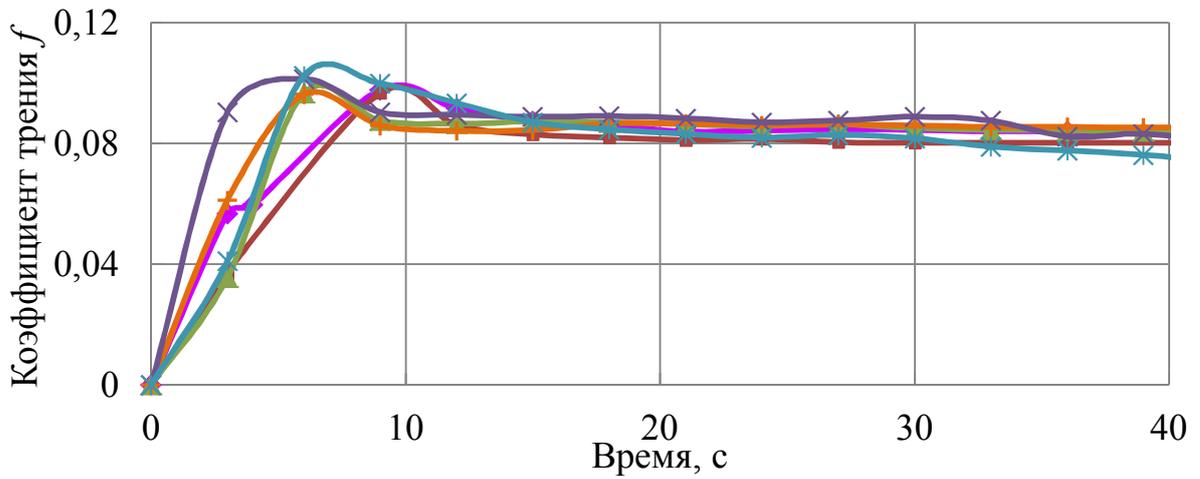
Исследование осуществлялось при количестве повторений нагружения усилием $P_{вн}$ не менее трех раз. Время каждого нагружения принималось 40 с. После каждого нагружения рабочие поверхности технологического инструмента обезжиривались, подвергались полировке, после чего повторялись операции начиная с п. 2 алгоритма.

3.4.4 Анализ результатов исследования

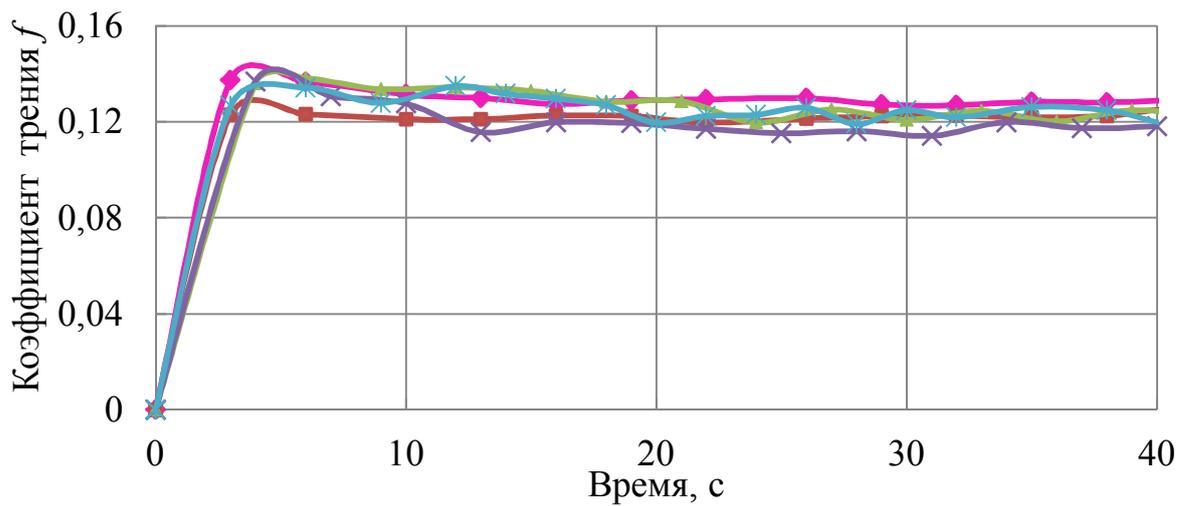
Результаты исследования по определению коэффициента трения скольжения при использовании смазочных материалов с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с приведены в виде эмпирических кривых изменения коэффициента трения скольжения от времени на рисунке 3.17.

Согласно представленным на рисунке 3.17 данным, в начальный момент времени изменение коэффициента трения характеризуется интенсивным увеличением с достижением максимального значения. Данный характер обусловлен пуском двигателя трибометра и разгоном диска до заданной скорости.

Выборка экспериментальных данных в установившемся режиме для смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с выполнялась в интервале от 20 до 30 с (Рисунок 3.18, а), для смазочного материала с вязкостью $\eta=7,2$ Па·с – в интервале от 22 до 32 с (Рисунок 3.18, б).



а

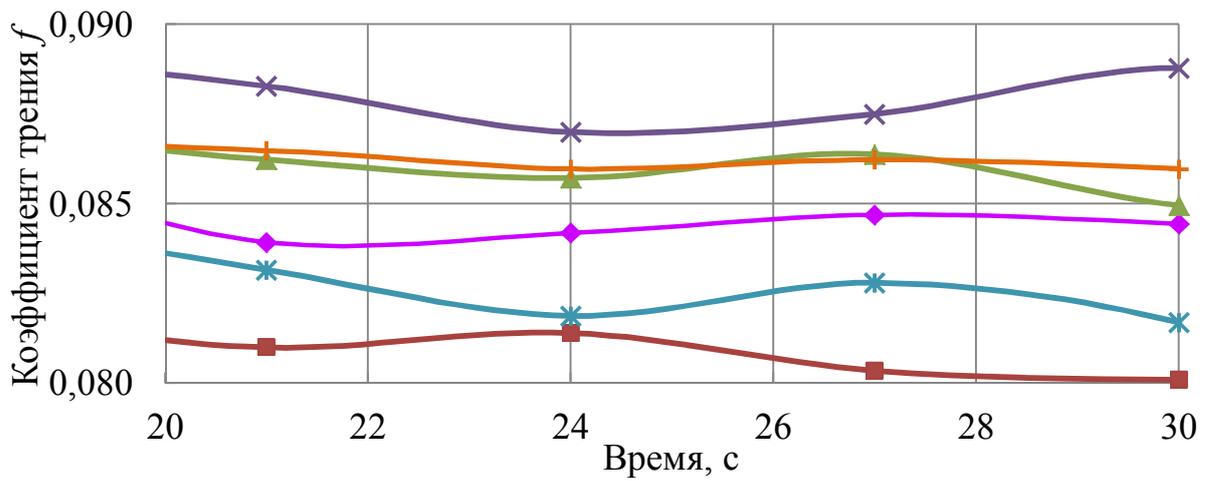


б

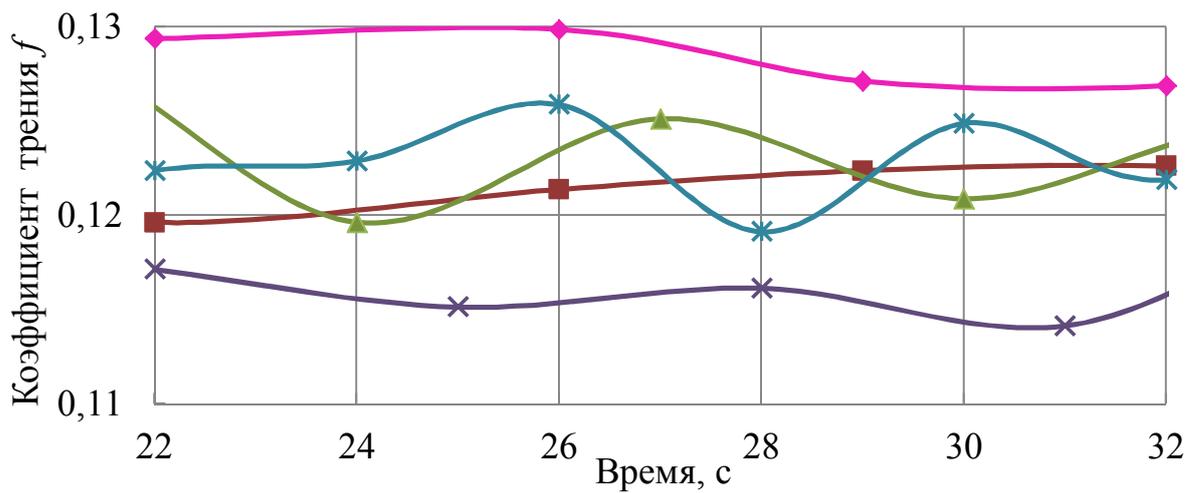
◆ – эксперимент №1; ▲ – эксперимент №2; ✕ – эксперимент №3;
 * – эксперимент №4; ■ – эксперимент №5; + – эксперимент №6

Рисунок 3.17 – Эмпирические кривые изменения коэффициента трения f при использовании смазочных материалов с вязкостью: а – $\eta=0,1$ Па·с; б – $\eta=7,2$ Па·с

Анализ данных выборки показал, что в установившемся режиме наблюдается достаточная сходимость результатов: при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с значение коэффициента трения изменяется от 0,08 до 0,09, для смазочного материала с вязкостью $\eta=7,2$ Па·с – от 0,11 до 0,13.



а



б

Рисунок 3.18 – Эмпирические кривые изменения коэффициента трения f в установившемся режиме при использовании смазочных материалов с вязкостью: а – $\eta=0,1$ Па·с; б – $\eta=7,2$ Па·с

С целью качественной оценки достоверности полученных результатов выполнялся их анализ с использованием одного из статистических методов [121]. Так для смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с математическое ожидание функции изменения коэффициента трения составило 0,0845; для смазочного материала с вязкостью $\eta=7,2$ Па·с – 0,1221 (Таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Статистические характеристики значений коэффициента трения при использовании смазочных материалов с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с и $\eta=7,2$ Па·с

Вязкость η , Па·с	Математическое ожидание \bar{f}	Среднее квадратичное отклонение $\sqrt{\sigma^2}$	Границы поля рассеяния	
			$\bar{f} + 3\sqrt{\sigma^2}$	$\bar{f} - 3\sqrt{\sigma^2}$
0,1	0,0845	0,0005	0,0861	0,0830
7,2	0,1221	0,0008	0,1196	0,1246

С использованием правила трех сигм [121] показано, что с вероятностью 99,7 % значения коэффициента трения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с попадают в интервал от 0,0830 до 0,0861; при использовании смазки с вязкостью $\eta=7,2$ Па·с – в интервал от 0,1196 до 0,1246 (Таблица 3.11).

3.5 Исследование ресурса смазочного материала с вязкостью 0,1 Па·с

Учитывая, что рациональное использование высокоэффективных смазочных материалов является одним из способов интенсификации волоочильного производства, дополнительно проводилось исследование влияния скорости волочения на коэффициент трения скольжения [126]. Исследование осуществлялось с использованием смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с, так как по результатам п.3.5 величина коэффициента трения, обеспечиваемая при его применении, имела меньшее среднее значение.

3.5.1 Постановка задачи исследования

Согласно техническому паспорту на смазочный материал с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с применение его ограничено скоростью волочения 40–60 м/мин. Согласно технической характеристике трубоволоочильного оправочного стана усилием 80 кН, например Синарского трубного завода, максимальная скорость волочения составляет 75 м/мин. Используя указанные резервы по увеличению

скорости волочения, дополнительно определялся коэффициент трения скольжения при частоте вращения диска 435 об/мин и 1 400 об/мин (согласно технической возможности трибометра).

Используемое оборудование, комплект инструмента и алгоритм исследования аналогичны представленным ранее в п.3.5. При этом время каждого нагружения увеличилось до 70 с.

3.5.2 Анализ результатов исследования

Результаты исследования влияния частоты вращения диска на коэффициент трения приведены на рисунке 3.19 в виде эмпирических кривых изменения коэффициента трения скольжения от времени и в таблице 3.12 в виде средних значений коэффициента трения в установившемся режиме.

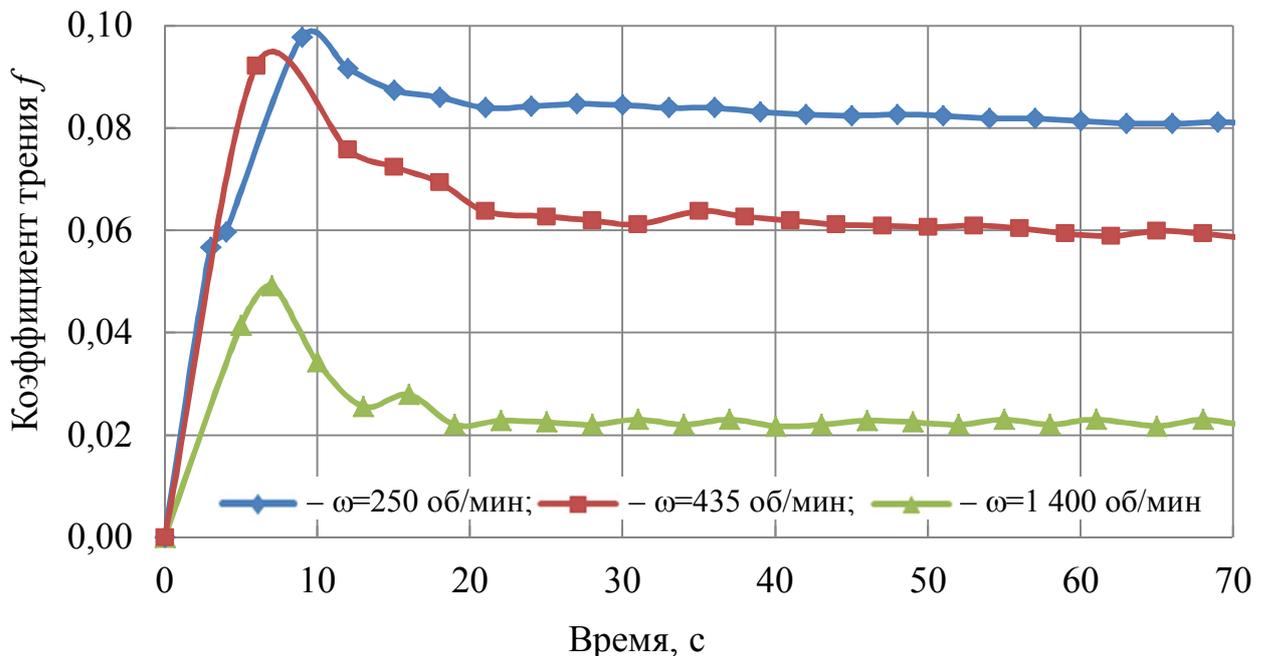


Рисунок 3.19 – Эмпирические кривые изменения коэффициента трения f для смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с при различной частоте вращения диска

Таблица 3.12 – Средние значения коэффициента трения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с в зависимости от частоты вращения

Частота вращения, ω , об/ мин	250	435	1 400
Среднее значение коэффициента трения f	0,0845	0,0610	0,0228

Из рисунка 3.19 следует, что с увеличением частоты вращения диска стабильный характер изменения коэффициента трения в установившемся режиме сохраняется. Соответственно можно утверждать, что гарантированно обеспечивается возможность работы пары трения «диск-палец» в режиме гидродинамического трения.

Численный анализ экспериментальных данных показал, что почти при шестикратном увеличении частоты вращения диска коэффициент трения скольжения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с в среднем уменьшается в 3,5 раза: от 0,0845 до 0,0228. При переходе к линейным скоростям получена эмпирическая скоростная зависимость изменения коэффициента трения:

$$f = 0,02 + 0,98v^{-0,912}, \quad (3.22)$$

где v – скорость волочения, м/мин.

Характер полученной зависимости согласуется с данными работы [122].

3.6 Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных величин усилия волочения труб на самоустанавливающейся оправке

Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных величин усилия волочения труб на самоустанавливающейся оправке выполнялась с использованием разработанной математической модели (глава 2), а также существующих моделей [25, 102, 104].

Расчеты выполнялись для случая экспериментального волочения труб из стали марки 10 по маршруту №2: $11,5 \times 1,75$ мм \rightarrow $9,0 \times \text{вн.} 6,0$ мм, при использовании самоустанавливающейся оправки №3 с углом конусности $\alpha_{on} = 10^\circ$,

волокни с углом конусности $\alpha_g = 13^\circ$. Сопротивление деформации стали марки 10 в недеформированном состоянии σ_{S0} и реологические коэффициенты a и b принимались на основе данных работы [99]. Коэффициенты трения на контактных поверхностях с технологическим инструментом принимались согласно данным таблицы 3.11 в зависимости от вязкости смазочного материала: при $\eta = 0,1$ Па·с – 0,0845, при $\eta = 7,2$ Па·с – 0,1221.

Учитывая, что в процессе экспериментального волочения оправка работала в положении близком к крайнему переднему, длина участка дополнительного обжатия рассчитывалась по формуле (2.5) при условии, что $k = 0,4$.

Результаты численной оценки приведены на рисунке 3.20. С использованием представленных данных, показано, что наилучшая сходимость расчетных и экспериментальных усилий волочения наблюдается при использовании разработанной математической модели. Погрешность в этом случае составляет не более 7 %. В то время как результаты расчета по существующим моделям отличаются от фактически зафиксированной величины усилия более чем на 13 %.

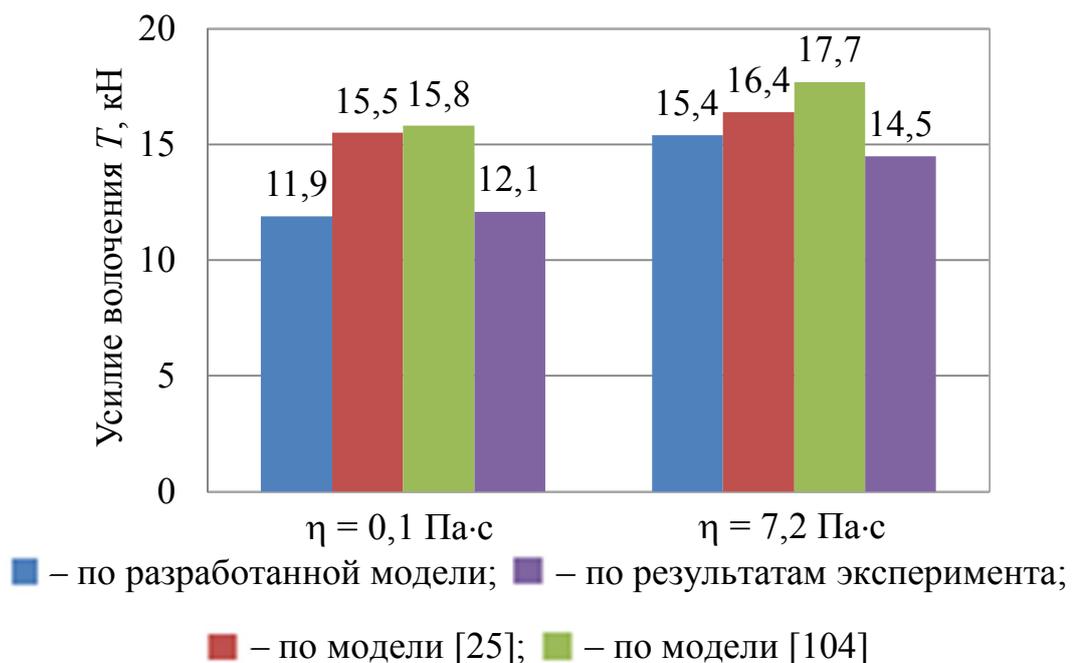


Рисунок 3.20 – Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных величин усилия волочения на самоустанавливающейся оправке при использовании смазочного материала с различной вязкостью

3.7 Выводы

1. Уточнены эмпирические зависимости изменения сопротивления пластической деформации стали марок 35 и 12Х1МФ от степени деформации при холодной обработке металлов давлением.

2. Исследования трибологических характеристик современных смазочных материалов позволили уточнить характер эмпирической зависимости их динамической вязкости в интервале температур от 25 до 240 °С. С использованием полученной зависимости имеется возможность оценки изменения вязкости смазочного материала по длине очага деформации при волочении в зависимости от деформационного разогрева.

3. На основе более детального анализа геометрии очага деформации – с учетом возможных осевых перемещений самоустанавливающейся оправки, изменения толщины стенки на участке редуцирования, радиуса скругления границы сопряжения конусного и калибрующего участков волоки – получены формулы для расчета минимально необходимых длин рабочих цилиндрического и конического участков самоустанавливающейся оправки.

4. Анализ положения самоустанавливающейся оправки в очаге деформации в ходе экспериментального исследования процесса волочения показал, что в большинстве случаев оправка занимает положение близкое к крайнему переднему. При таком режиме работы оправки процесс деформации сопровождается некоторым увеличением усилия волочения в сравнении с установившимся режимом, что подтверждает анализ осциллограммам изменения усилия.

5. Показано влияние интенсивности изменения вязкости смазочного материала от температуры по длине очага деформации на условия обеспечения равновесного положения самоустанавливающейся оправки.

6. Результаты экспериментального исследования процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке свидетельствуют, что вероятность нарушения стабильности процесса волочения тем меньше, чем меньше разность углов $\alpha_g - \alpha_{on}$, больше суммарная степень деформации и абсолютное обжатие по

толщине стенки. При этом выявлено, что при прочих равных условиях с уменьшением разности углов $\alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{он}}$ усилие волочения уменьшается.

7. Показано, что использование технологического инструмента, обеспечивающего разность углов $\alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{он}} = 3^\circ$, позволяет гарантированно получить трубы с внутренним диаметром в диапазоне предельных отклонений, требуемых нормативной документацией, в том числе и зарубежными стандартами.

Значительного влияния на качественные характеристики труб вязкость смазочных материалов не оказывает. Однако стоит отметить, что при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с обеспечивается несколько меньшая величина шероховатости внутренней поверхности труб.

8. Анализ особенностей осуществления операции задачи оправок в полость трубы в ходе экспериментальных работ показал существенные трудности использования задающих стержней. Отмечено, что отсутствие контроля усилия перемещения оправки могло также способствовать нарушению режима ее работы.

9. С использованием оригинальной разработанной методики определены коэффициенты трения скольжения для исследуемых современных смазочных материалов. Выявлено, что при использовании смазочных материалов с менее интенсивным характером изменения вязкости на контактной поверхности обеспечивается меньший коэффициент трения и соответственно меньшее усилие волочения, что и наблюдалось при экспериментальном исследовании. Таким образом, показано, что более эффективным решением уменьшения энергосиловых параметров процесса оправочного волочения и обеспечения при этом более стабильного режима работы самоустанавливающейся оправки является использование смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с.

10. На основе результатов исследования влияния скорости скольжения на изменение коэффициента трения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с определен вид эмпирической скоростной зависимости. Выявлено, что с увеличением скорости волочения коэффициент трения уменьшается по экспоненциальной зависимости. С использованием полученных

данных определена возможность расширения диапазона применимости смазочного материала и соответственно повышения эффективности использования его ресурса. Особенности работы смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с при повышенных скоростях волочения гарантированно обеспечивают протекание процесса волочения в режиме гидродинамического трения.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Освоение технологии изготовления холоднодеформированных труб при использовании способа волочения на самоустанавливающейся оправке реализовывалось на производственных площадках Синарского трубного завода (г. Каменск-Уральский) на примере изготовления труб размерами $16,0 \times \text{вн.}12,0$ мм из стали марки 10 в соответствии с требованиями DIN EN 10305-1.

4.1 Разработка технологических режимов волочения на самоустанавливающейся оправке труб размерами $16,0 \times \text{вн.}12,0$ мм

Проектирование маршрута изготовления труб размерами $16,0 \times \text{вн.}12,0$ мм из стали марки 10 выполнялось при условии использования труб-заготовок под волочение размерами минимально возможными со стана холодной прокатки труб (ХПТ). Анализ калибровок инструмента станом ХПТ Синарского трубного завода показал, что рациональным является использование под оправочное волочение труб размерами $16,0 \times \text{вн.}12,0$ мм холоднокатаной трубы размерами $25,0 \times 2,5$ мм.

С целью более эффективного использования ресурса смазочного материала с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с волочение осуществлялось со скоростью 70 м/мин. Учитывая, что экспериментальное исследование процесса волочения на самоустанавливающейся оправке реализовывалось при скоростях значительно меньших в сравнении с реальными производственными условиями, коэффициент вытяжки ограничивался значением $\mu = 1,4$. При этом абсолютное обжатие по толщине стенки принималось равным 0,25 мм.

Учитывая, что 73 % изменений конечной точности труб при волочении на оправке с цилиндро-конической профилировкой обусловлено влиянием исходной точности трубы-заготовки [127], формоизменение холоднокатаной трубы размерами $25,0 \times 2,5$ мм осуществлялось за два прохода оправочного волочения с равенством величины обжатий по толщине стенки в каждом (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Маршрут и технологические режимы оправочного волочения труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм из стали марки 10

№ прохода	Размеры труб, мм	Абсолютная деформация, мм		Коэффициент вытяжки	Относительная деформация, %	Коэффициенты деформации	
		по наружному диаметру	по толщине стенки			по наружному диаметру	по толщине стенки
I	25,0×2,5 → 18,5×2,25	6,50	0,25	1,54	35,00	1,38	1,11
II	18,5×2,25 → 16,0×вн.12,0	2,50	0,25	1,31	23,42	1,16	1,13

Проход волочения №I реализовывался по действующей технологии Синарского трубного завода при использовании удерживаемой цилиндрической оправки, проход №II – с использованием самоустанавливающейся оправки конструкции, аналогичной рисунку 3.7, с углом $\alpha_{on} = 10^\circ$ (Таблица 4.2). При этом использовались твердосплавные волокни с углом $\alpha_g = 13^\circ$, таким образом, обеспечивалась разность углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$. Самоустанавливающиеся оправки изготавливались из стали марки 70 с дополнительной обработкой (азотированием) рабочих поверхностей до твердости 65 единиц HRC_Э.

Таблица 4.2 – Параметры профилировки самоустанавливающихся оправок для волочения труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм в соответствии с рисунком 3.7

d , мм	α_{on} , град	β_{on} , град	$D_{\bar{b}}$, мм	d_x , мм	$l_{ц}$, мм	l_k , мм	$l_{D\bar{b}}$, мм	l_x , мм	L_{on} , мм	c , мм
12	10	1-2	13,52	10,0	7,0	5,0	5,0	14,0	35,0	2,0

Согласно результатам предварительной численной оценки силовых параметров волочения по проходу №II с использованием разработанной модели расчетное напряжение волочения составило 332 Н/мм², усилие волочения составило 29,2 кН. При этом коэффициент трения на контактных поверхностях с инструментом рассчитывался по формуле (3.22) для скорости волочения 70 м/мин

и принимался равным 0,033. Следует отметить, что в процессе расчета условие обеспечения требуемой величины коэффициента запаса прочности K_3 , т.е. условие $\sigma_S / \sigma_x \geq 1,35$, выполнялось лишь при значениях коэффициента k , определяющего положение оправки в очаге деформации, равного 0,5 и более.

4.2 Опытное-промышленное волочение труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм из стали марки 10

Изготовление опытной партии холоднодеформированных труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм из стали марки 10 оправочным волочением осуществлялось в соответствии с Технологическим регламентом ТР 161-В2-1833-2013 (Приложение А), разработанным автором настоящего диссертационного исследования совместно со специалистами Центральной заводской лаборатории Синарского трубного завода.

Объем опытной партии холоднокатаных труб размерами 25,0 × 2,50 мм и длиной 2,0 м составил 56 кг (40 м). Результаты инструментального контроля геометрических размеров и шероховатости внутренней и наружной поверхностей образцов холоднокатаных труб приведены в таблице 4.3. По результатам визуального осмотра холоднокатаные трубы имели светлую наружную и внутреннюю поверхности. Несовершенств поверхности выявлено не было.

Таблица 4.3 – Фактические размеры и шероховатость поверхности холоднокатаных труб номинальными размерами 25,0 × 2,50 мм

Средние значения фактических размеров труб, мм		Среднее значение шероховатости поверхности труб, мкм	
Наружный диаметр	Толщина стенки	Наружной	Внутренней
24,93	2,61	0,77	2,49

Волочение труб по маршруту 25,0 × 2,50 мм → 18,50 × 2,25 мм (проход №I) на удерживаемой оправке проводилось на стане ХВТ №13 усилием 80 кН, со скоростью 70 м/мин и использованием заводского технологического инструмента. Подготовка холоднокатаных труб включала операции химической обработки,

формирования головок, нанесения смазочного материала. Заковка головок осуществлялась на машине АВ-240. Нанесение смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с осуществлялось согласно действующей технологии – окунаем пакет труб в ванну с раствором смазки, подогретую до температуры 70 °С, выдержкой в течение 20 мин, при этом через 5 мин после начала обработки пакет труб извлекался, обеспечивалось стекание смазочного материала в течение 1 мин, после чего пакет повторно погружался в ванну еще на 15 мин.

Результаты инструментального контроля геометрических размеров и шероховатости внутренней и наружной поверхностей образцов труб номинальными размерами 18,50 × 2,25 мм приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Фактические размеры и шероховатость поверхности труб номинальными размерами 18,50 × 2,25 мм

Средние значения фактических размеров труб, мм		Среднее значение шероховатости поверхности труб, мкм	
Наружный диаметр	Толщина стенки	Наружной	Внутренней
18,48	2,27	0,88	0,84

Волочение труб по маршруту 18,50 × 2,25 мм → 16,0 × вн.12,0 мм (проход №II) на самоустанавливающейся оправке также проводилось на стане ХВТ №13 со скоростью 70 м/мин. Операции химической обработки, формирования головок и нанесения смазочного материала перед волочением на самоустанавливающейся оправке выполнялись по аналогии с действующей технологией. Перемещение оправки в направлении к закованному концу трубы и до ее упора в закованный конец осуществлялось вручную посредством стержня. После чего, стержень извлекался, труба задавалась в волоку и захватывалась клещами тележки.

Следует отметить, что осуществление операции задачи и перемещения оправки в полости трубы вручную сопровождалось увеличением трудоемкости и снижением производительности. Сложность применения стержней в процессе перемещения оправки в данном случае была обусловлена потерей устойчивости тонкого стержня большой длины – его колебаниями и изгибом.

Результаты инструментального контроля геометрических размеров и шероховатости внутренней и наружной поверхностей образцов труб номинальными размерами 16,0 × вн.12,0 мм приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Фактические размеры и шероховатость поверхности труб номинальными размерами 16,0 × вн.12,0 мм

Средние значения фактических размеров труб, мм		Среднее значение шероховатости поверхности труб, мкм	
Наружный диаметр	Внутренний диаметр	Наружной	Внутренней
15,92	12,18	1,08	1,02

4.3 Анализ результатов опытно-промышленного волочения

В результате промышленной реализации способа волочения труб на самоустанавливающейся оправке три из 20 труб были забракованы по причине осуществления волочения в безоправочном режиме.

4.3.1 Анализ режима работы самоустанавливающейся оправки

Режим работы самоустанавливающихся оправок в процессе промышленного волочения анализировался путем оценки характера поврежденности рабочих поверхностей оправок в сравнении с фактическими значениями внутреннего диаметра труб и давлениями, действующими на оправку по длине очага деформации, рассчитанными с использованием математической модели. На основе сопоставления характера повреждений рабочих поверхностей оправки и результатов фактических замеров внутреннего диаметра труб (Рисунок 4.1), сделаны следующие выводы:

1. Зоны с большей степенью износа рабочих поверхностей оправки испытывали большие нагрузки. Соответственно более поврежденные зоны цилиндрического и конического участков являются контактными поверхностями оправки и металла трубы при деформации по толщине стенки на конусе волоки.

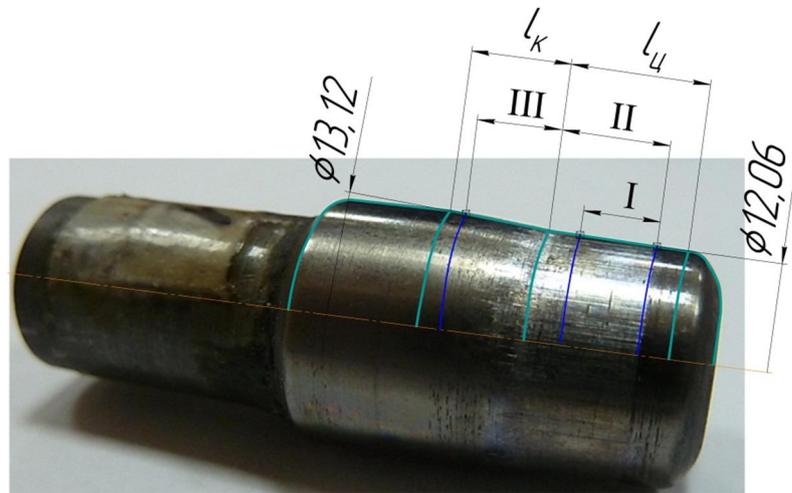


Рисунок 4.1 – Фотографическое изображение характерных зон повреждений оправки: I – зона фактических значений внутреннего диаметра труб; II – зона поврежденности цилиндра оправки; III – зона поврежденности конуса оправки

Менее поврежденные зоны – зоны схода трубы с оправки. Согласно результатам расчета по разработанной математической модели данные выводы подтверждаются характерным распределением давления $p_{оп}$, действующего на оправку по длине очага деформации (Рисунок 4.2).

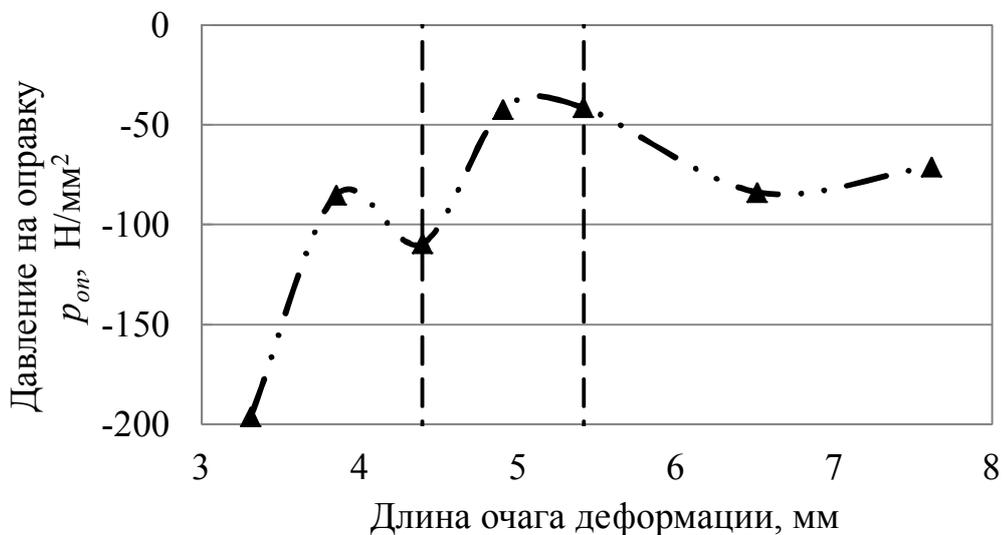


Рисунок 4.2 – Функция распределения давления $p_{оп}$, действующего на оправку по длине очага деформации, при волочении труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм

2. Границами более поврежденной зоны цилиндра оправки являются диаметры 12,06 и 12,21 мм. Данному диапазону соответствует 71 % выполненных замеров внутреннего диаметра труб. Также следует отметить, что расположение самой крайней риски цилиндра оправки размером 12,03 мм соответствует минимальному замеренному значению внутреннего диаметра труб. Графическое сопоставление фактических значений внутреннего диаметра труб относительно зон поврежденности цилиндра оправки приведено на рисунке 4.1.

3. На основе результатов графического сопоставления фактических значений внутреннего диаметра труб с характерными точками очага деформации выявлено, что оправка работала в положении близком к крайнему заднему.

4.3.2 Анализ причин волочения в безоправочном режиме.

Разработка нового способа задачи и перемещения самоустанавливающейся оправки в полости трубы

Причиной отсутствия втягивания оправки в очаг деформации в начальный момент волочения послужило наличие во внутренней полости трубы у основания головки некоторого объема смазочного материала (так называемой пробки), которая вытесняла оправку из очага деформации в процессе волочения. Анализ причин образования смазочной пробки показал, что ухудшение условий циркуляции смазочного материала обусловлено не только малым внутренним диаметром труб [31], но и осуществлением операции формирования головки труб способом горячей деформации. Согласно технологии Синарского трубного завода операция формирования головок труб осуществляется до химической обработки. При этом операция горячей заковки головок сопровождается образованием теплой воздушной пробки у основания головки и зачастую неравномерным уменьшением внутренней полости по длине головки. С целью исключения данного явления рекомендовано операцию формирования головок труб внутренним диаметром 12,0 мм и менее осуществлять способом холодной деформации. Это гарантированно позволит обеспечить наличие внутренней

полости по всей длине головки и движение смазочного материала в полости трубы, а также исключить образование смазочной пробки у основания головки.

С целью оперативного исключения возможности безоправочного волочения в период опытно-промышленного опробования было принято решение подпирать самоустанавливающуюся оправку в начальный момент волочения посредством прутка вручную. Осуществление дополнительной операции потребовало определенных трудозатрат и сопровождалось потерей производительности. Неэффективными по этим же причинам оказались и операции задачи и перемещения оправки до головки трубы. Учитывая, что указанные операции определяют исходное положение оправки в очаге деформации, контроль режимов их осуществления является актуальной задачей.

Однако, как показал аналитический обзор, использование других известных технических решений в виде различных приспособлений является проблематичным ввиду малости размеров оправок и деформируемых труб.

С целью сокращения затрат на технологический инструмент, уменьшения трудоемкости операций по подготовке труб к волочению на самоустанавливающейся оправке и увеличения производительности разработано техническое решение в виде изобретения [128].

Согласно разработанному решению перемещение оправки в полости трубной заготовки до основания головки осуществляют подачей в полость заготовки сжатого воздуха, при этом величину давления воздуха P , Н/мм², определяют по следующей зависимости:

$$P = (0,01 \div 0,02) \frac{\sigma_{S0}}{D_3} (D_3 - d_3), \quad (4.1)$$

где σ_{S0} – сопротивление металла пластической деформации в недеформированном состоянии, Н/мм²;

D_3 , d_3 – наружный и внутренний диаметры трубной заготовки, соответственно, мм.

Кроме того, перед подачей сжатого воздуха устанавливают пыж в полость заготовки.

По второму варианту поставленная задача решается за счет того, что перемещение оправки в полости трубной заготовки осуществляют воздействием на оправку генератора импульсной нагрузки, при этом начальную скорость движения оправки V , м/с, определяют по следующей зависимости:

$$V = (55 \div 70) \frac{d_m}{D_m}, \quad (4.2)$$

где D_m , d_m – наружный и внутренний диаметры трубы, соответственно, мм.

Увеличение производительности процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке до 10 % достигается за счет сокращения времени и количества осуществляемых действий по перемещению оправки. Контроль режимов перемещения оправки обеспечивает ее требуемое позиционирование в полости трубы, исключая необходимость использования задающих стержней.

4.3.3 Оценка соответствия опытно-промышленной партии труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм требованиям DIN EN 10305-1

В соответствии с требованиями DIN EN 10305–1 для труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм допустимые значения наружного диаметра находятся в интервале от 15,84 до 16,00 мм, внутреннего диаметра – в интервале от 12,00 до 12,30 мм. Согласно результатам контроля наружного и внутреннего диаметра опытно-промышленная партия труб номинальными размерами 16,0 × вн.12,0 мм соответствует требованиям DIN EN 10305–1. Максимальная фактическая величина разностенности изготовленных труб составила 2,4 %, что также соответствует требованиям DIN EN 10305–1.

Визуальный контроль наружной и внутренней поверхностей труб размерами 16,0×вн12,0 мм не выявил каких-либо несовершенств.

4.4 Выводы

1. Решена основная задача опытно-промышленного опробования технологии изготовления прецизионных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм – показана принципиальная возможность внедрения способа волочения на самоустанавливающейся оправке в действующий технологический процесс с использованием действующих производственных мощностей и получением продукции, отвечающей предъявляемым к ней требованиям.

2. В результате промышленной реализации изготовлено 45 кг труб размерами 16,0 × вн.12,0 мм, удовлетворяющих требованиям DIN EN 10305–1 к предельным отклонениям размеров.

Показано, что осуществление волочения по рекомендуемым режимам деформации и разности углов $\alpha_e - \alpha_{on} = 3^\circ$, позволяет гарантированно получить трубы с размером внутреннего диаметра, отвечающим требованиям нормативной документацией, в том числе и зарубежными стандартами.

3. На основе анализа режима работы самоустанавливающейся оправки в процессе опытного опробования, выявлено, что с увеличением скорости волочения до промышленной, самоустанавливающаяся оправка занимает в очаге деформации положение близкое к крайнему заднему, способствуя тем самым уменьшению усилия волочения. Полученный результат подтвержден расчетом с использованием разработанной математической модели. На основании чего разработанная методика определения силовых параметров при волочении на самоустанавливающейся оправке внедрена в рабочий процесс инженерно-технических служб Синарского трубного завода с целью повышения оперативности и эффективности расчетов в производственных условиях (Приложение Б), а также в учебный процесс подготовки студентов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (Приложение В).

4. Инструментальный контроль геометрических размеров труб показал, что трубы тянутые на удерживаемой оправке, в сравнении с трубами, полученными

на самоустанавливающейся оправке, характеризуются меньшим разбросом значений по наружному диаметру и толщине стенки (от 0,01 до 0,03 мм).

По отношению к холоднокатаным трубам параметр шероховатости внутренней поверхности при волочении на удерживаемой и затем на самоустанавливающейся оправках изменялся в следующих диапазонах: 2,49 мкм → 0,84 мкм → 1,02 мкм.

Выявленное отличие точности размеров и качества поверхности труб, протянутых на удерживаемой и самоустанавливающейся оправках, обусловлено, в том числе, и материалом оправок. Удерживаемая оправка изготавливалась из твердого сплава, а самоустанавливающаяся оправка – из стали. Стойкость стальной самоустанавливающейся оправки, даже при дополнительном азотировании поверхности, низкая – следы износа наблюдались уже после волочения 25 м опытной партии труб. Изготовление самоустанавливающейся оправки из твердосплавных материалов позволит увеличить точность геометрических размеров и уменьшить шероховатость поверхности труб.

5. Выявлено, что возникновение смазочной пробки у основания головки обусловлено технологией подготовки трубы к волочению. С целью более качественной обработки внутренней поверхности труб эффективным является формирование головки труб способом холодной деформации, обеспечивающим наличие внутренней полости по всей длине головки и соответственно движение смазочного материала в полости трубы.

6. Реализация операций задачи и перемещения оправки с использованием способа, разработанного автором настоящего диссертационного исследования и оформленного в виде патента на изобретение, позволит сократить затраты на технологический инструмент, уменьшить трудоемкость операций по подготовке труб к волочению на самоустанавливающейся оправке и увеличить производительность процесса волочения до 10 %.

7. Согласно результатам опытного опробования обрывов труб при волочении не наблюдалось. Учитывая, что в производственных условиях эффективность смазочного материала оценивают, в том числе, по числу обрывов,

можно заключить, что предложенный скоростной режим работы обеспечивает благоприятные условия на контактных поверхностях и позволяет при этом повысить производительность процесса волочения не менее чем на 10 %. Учитывая, что при скорости волочения 70 м/мин применение смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с обеспечивает дополнительное уменьшение коэффициента трения, сделан вывод, что предлагаемый режим оправочного волочения является эффективным с точки зрения уменьшения силовых параметров деформации.

5 РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ С ВНУТРЕННИМ ДИАМЕТРОМ ОТ 6,0 ДО 12,0 ММ

5.1 Разработка рациональной конструкции и профилировки самоустанавливающейся оправки

Анализ результатов опытно-экспериментальных работ с использованием разработанной математической модели показал, что рационально использовать цельнотелую твердосплавную самоустанавливающуюся оправку со следующими изменениями в профилировке (Рисунок 5.1):

- носок оправки после передней фаски выполнить с дополнительным захватным коническим участком протяженностью $l_\gamma = l_\mu$ и углом γ , определяемым из условия: $\gamma < \alpha_{оп}$. Указанная профилировка обеспечит дополнительное самозатягивание оправки в очаг деформации, исключая возможность осуществления безоправочного волочения;
- симметрично относительно середины бочки оправки расположить вторую рабочую часть оправки: конический и цилиндрический участки, включая дополнительный захватный участок. Это решение позволит еще более сократить затраты на изготовление технологического инструмента.

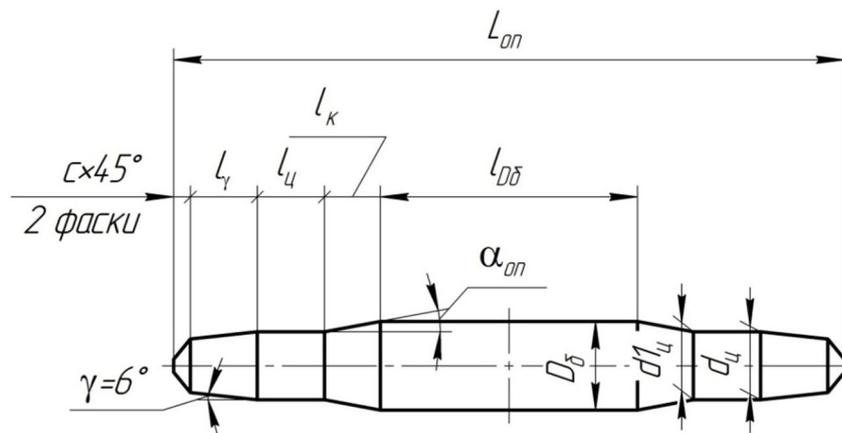


Рисунок 5.1 – Звено разработанной самоустанавливающейся оправки

При этом рационально изготовление оправок с профилировкой согласно рисунку 5.1 осуществлять в соответствии с решением, разработанным автором настоящего диссертационного исследования [129].

Разработанная самоустанавливающаяся оправка работает следующим образом. После отделения звеньев друг от друга, например путем абразивной резки, оправка готова к использованию. При выявлении дефектов на рабочей поверхности первых рабочих участков оправки, а также изменения их размеров, оправку задают в трубу другой стороной с неизношенными рабочими коническим и цилиндрическим участками. После чего волочение продолжают.

Симметричное расположение рабочих участков позволяет увеличить общую длину оправки, упрощая при этом операцию введения ее в полость трубы и обеспечивая лучшее центрирование в очаге деформации, что также способствует повышению точности тянутых труб. Увеличение площади поверхности разработанной самоустанавливающейся оправки дает возможность подачи совместно с ней в очаг деформации большего количества смазочного материала.

Следует отметить, что также возможно использование оправки разработанной конструкции, включающей не менее двух звеньев, с отделением их друг от друга по мере износа. В данном случае, переходные участки между звеньями оправки, являются соответствующими зонами накопления смазочного материала, который в процессе осуществления пластической деформации вовлекается в очаг деформации, обеспечивая требуемый характер трения на контакте металла трубы с инструментом.

На основе обобщения результатов опытно-экспериментальных работ и численного исследования с использованием разработанной математической модели, определена рациональная величина разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ – от $2,0^\circ$ до $2,5^\circ$. При этом волоки выполняют с углом $\alpha_g = 13^\circ$, а оправки с углом α_{on} от $10^\circ 30'$ до 11° . Выбор длин рабочих цилиндрического и конического участков с учетом формул (3.9), (3.10) ограничивается условиями:

$$l_u > l_u^{\min}, \quad (5.1)$$

$$l_k > l_k^{\min}. \quad (5.2)$$

Обобщая результаты проведенных численных исследований, разработана классификация самоустанавливающихся оправок для изготовления труб внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм, отвечающих требованиям как отечественной (ГОСТ 9567, ТУ 14–161–200), так и зарубежной (DIN EN 10305–1) нормативной документации. В качестве основных признаков унификации количества инструмента приняты следующие критерии:

- по длине рабочего цилиндрического участка l_y принят угол конуса оправки α_{on} , так как он в большей степени изменяет параметр l_y ;
- по длине рабочего конусного участка оправки l_k – угол конуса оправки α_{on} и величина обжатия по толщине стенки ΔS .

Параметры рациональной профилировки самоустанавливающихся оправок для изготовления прецизионных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм приведены в таблице 5.1 в соответствии с обозначениями рисунка 5.1. Рабочие чертежи приведены в Приложении Г.

Таблица 5.1 – Параметры рациональной профилировки самоустанавливающихся оправок для изготовления труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм

Параметры профилировки										
α_{on} , град	d_y , мм	$d1_y$, мм	l_γ , мм	l_y , мм	l_k , мм			D , мм		
					при ΔS			при ΔS		
					0,15	0,20	0,25	0,15	0,20	0,25
Для изготовления труб внутренним диаметром $d_1 = 6,0$ мм										
10°30'	6,10	6,15	6,0	6,0	–	4,5	5,0	–	$d1_y$ +2,05	$d1_y$ +1,85
11°			7,0	7,0	4,5	5,0	–	$d1_y$ +2,15	$d1_y$ +2,35	–
Для изготовления труб внутренним диаметром $6,0 \text{ мм} < d_1 \leq 12,0 \text{ мм}$										
10°30'	d_1 -0,05	d_1 +0,05	6,0	6,0	–	4,5	5,0	–	$d1_y$ +2,05	$d1_y$ +1,85
11°			7,0	7,0	4,5	5,0	–	$d1_y$ +2,15	$d1_y$ +2,35	–

5.2 Разработка рациональных режимов волочения труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм на самоустанавливающейся оправке

На основе анализа результатов опытно-экспериментальных работ и с использованием разработанной математической модели установлено, что при проектировании маршрутов волочения прецизионных труб с заданным внутренним диаметром менее 12,0 мм с использованием самоустанавливающейся оправки следует соблюдать следующие рекомендации:

1. Максимальный коэффициент вытяжки при однопроходном волочении на самоустанавливающейся оправке ограничивается значением $\mu_{\max}^1 \leq 1,6$. Для маршрутов изготовления двойным или n -проходным волочением на самоустанавливающейся оправке максимальный коэффициент вытяжки ограничивается значением $\mu_{\max}^{2n} \leq 1,5$.

С целью сведения к минимуму возможных причин нарушения стабильных условий процесса волочения на самоустанавливающейся оправке рекомендуемый минимальный коэффициент вытяжки ограничивается значением $\mu_{\min} \geq 1,35$.

2. Режим обжатий по наружному диаметру при однопроходном волочении на самоустанавливающейся оправке следует ограничивать следующим образом:

- максимальное обжатие по наружному диаметру – 0,25 % от исходного, но не более 5,0 мм;
- минимальное обжатие по наружному диаметру – 2,5 мм.

По толщине стенки рекомендуется назначать обжатие в зависимости от наружного диаметра трубы согласно данным таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Обжатие по толщине стенки трубы

В миллиметрах

Наружный диаметр	Обжатие по толщине стенки
от 8 до 10	от 0,15 до 0,20
св. 10 до 15	св. 0,20 до 0,25
св. 15 до 18	св. 0,25 до 0,35

При двойном или n -проходном волочении на самоустанавливающейся оправке рекомендуется уменьшать частные обжатия, как по наружному диаметру, так и по толщине стенки. При этом максимальное обжатие по наружному диаметру ограничивается 0,20 % от исходного, но не более 4,0 мм. Что касается обжатия по толщине стенки, то при n -проходном волочении рациональным является назначение обжатия по толщине стенки постоянной величины в соответствующих диаметральных группах размеров:

- при наружном диаметре от 8 до 10 мм – 0,15 мм;
- при наружном диаметре св. 10 до 15 мм – 0,20 мм;
- при наружном диаметре св. 15 до 18 мм – 0,25 мм.

Следует отметить, что выделенные граничные значения наружного диаметра условны и при необходимости могут быть смещены.

При проектировании маршрутов изготовления труб с отношением S/D , отличным от исследуемого, при однопроходной или n -проходной схеме также рекомендуется уменьшать величину частных обжатий, как по наружному диаметру, так и по толщине стенки.

5.3 Разработка технологии изготовления прямолинейных холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм

Технология изготовления прямолинейных холоднодеформированных труб приведена на примере двух типоразмеров: 16,0 × вн12,0 мм и 9,0 × вн6,0 мм [130].

На основании рекомендаций, изложенных в п.5.1 и п.5.2, с использованием разработанной математической модели выполнен анализ напряженного состояния возможных режимов волочения труб размерами 16,0 × вн12,0 мм и 9,0 × вн6,0 мм. При этом в качестве критерия эффективности использовался коэффициент запаса прочности переднего конца трубы K_3 , определяемый по формуле [105]:

$$K_3 = \frac{\sigma_S}{\sigma_x}, \quad (5.7)$$

где σ_x – напряжение волочения, Н/мм²;

σ_s – сопротивление металла пластической деформации, Н/мм².

Как было отмечено в п. 2.1 коэффициент K_3 принимают равным от 1,35 до 1,60 [105]. При этом значения K_3 близкие к единице свидетельствуют о повышенной вероятности обрывности труб, что приведет к увеличению простоев и уменьшению производительности. Значения K_3 много большие рекомендуемых свидетельствуют о недостаточном использовании ресурса пластичности деформируемого металла и также уменьшении производительности.

В таблице 5.3 приведены эффективные с точки зрения использования ресурса пластичности деформируемого металла режимы волочения труб размерами 16,0 × вн12,0 мм и 9,0 × вн6,0 мм.

Технология изготовления холоднодеформированных труб по маршрутам, представленным в таблице 5.3, разработана с учетом предъявляемых к конечной продукции требований и включает следующие процессы деформации: прокатка на станах холодной прокатки, волочение холоднокатаных труб на цепном стане с использованием удерживаемой цилиндрической оправки (до внутреннего диаметра не менее 14,0 мм) и волочение труб внутренним диаметром 12,0 мм и менее на готовый размер на цепном волочильном стане с использованием самоустанавливающейся оправки.

При этом волочение на удерживаемой оправке осуществляют при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с и со скоростью волочения 70 м/мин. После волочения труб на удерживаемой цилиндрической оправке на размер, являющийся заготовкой для волочения на самоустанавливающейся оправке, цикл промежуточных операций, таких как порезка головок, обезжиривание и сушка, термообработка и правка, осуществляют по штатным режимам.

Формирование головок труб перед волочением на самоустанавливающейся оправке осуществляют способом холодной деформации с целью сохранения внутренней полости головки. Использование для этого радиально ковочной машины

Таблица 5.3 – Маршруты изготовления прецизионных холоднодеформированных труб размерами 16,0 × вн12,0 мм и 9,0 × вн6,0 мм на цепных труболовочильных станах

№ прохода	Тип оправки ¹⁾	Размеры труб, мм						Параметры формоизменения						Расчетные силовые параметры волочения		Коэффициент запаса прочности
		до деформации			после деформации			Абсолютное обжатие, мм		Коэффициент деформации		Коэффициент вытяжки	Степень деформации, %	Напряжение ²⁾ , Н/мм ²	Усилие, кН	
		D_3	S_3	d_3	D_m	S_m	d_m	по диаметру	по толщине стенки	по диаметру	по толщине стенки					
								ΔD	ΔS	μ_d	μ_s	μ	ε	σ_x	T	
Труба размерами 9,0×вн6,0 мм																
1	У	25,0	2,50	20,0	18,5	2,15	14,1	6,5	0,35	1,38	1,16	1,60	37,5	459 ³⁾	50,7	1,26
2	СУ	18,5	2,15	14,1	14,5	1,90	10,6	4,1	0,25	1,31	1,13	1,48	32,4	427	32,1	1,31
3		14,5	1,90	10,7	11,5	1,65	8,2	2,9	0,25	1,27	1,15	1,46	31,6	403	20,6	1,38
4		11,5	1,65	8,2	8,93	1,42	6,1	2,57	0,23	1,31	1,16	1,52	34,4	413	13,8	1,39
Труба размерами 16,0×вн12,0 мм																
1	СУ	20,0	2,25	15,5	15,93	1,97	12,0	4,07	0,29	1,28	1,14	1,45	31,1	421	36,4	1,32

¹⁾ У – удерживаемая оправка; СУ – самоустанавливающаяся оправка.
²⁾ Определено при значении коэффициента трения 0,033 (формула 3.22).
³⁾ Определено с использованием разработанной математической модели, адаптированной для процесса волочения на удерживаемой оправке.

модели В-242 позволит обеспечить плавную подачу трубы в зону обработки и обратно. Технические характеристики данной машины позволяют осуществлять заковку труб диаметром от 5 до 58 мм, длиной до 8 м. Длину и диаметр головки труб перед волочением на самоустанавливающейся оправке определяют следующим образом: для труб диаметром менее 18 мм – длина головки составляет от 90 до 120 мм; диаметр головки должен быть меньше диаметра трубы после волочения не более чем на 2 мм. При переходе на следующий типоразмер осуществляют обрезку $1/2$ длины старой головки с последующей ее подбивкой.

Последующий цикл операций химической обработки исключает травление и промывку, так как термическая обработка в защитной атмосфере и холодная заковка головок этого не требуют. В качестве смазочного материала используют смазку с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с, нанесение которой осуществляют в соответствии с действующей технологией.

Волочение труб на самоустанавливающейся оправке осуществляют на действующих труболовильных станах, работающих в безопрочноном или оправочном режиме. При использовании оправочных станов исключают операцию подвода/отвода стержня с удерживаемой оправкой. При этом волочение осуществляют со скоростью 70 м/мин.

Геометрические размеры самоустанавливающихся оправок выбирают в соответствии с рекомендациями, изложенными в п.5.1. Перемещение самоустанавливающейся оправки в полости трубы до головки осуществляют с использованием предложенного способа: путем подачи в полость заготовки сжатого воздуха или путем воздействия на оправку генератора импульсной нагрузки (п.4.3.2). При этом реализация способа перемещения оправки путем подачи сжатого воздуха возможна с применением пускового пневматического устройства фирмы «Compro Tube Clean» (Швейцария) модели CES 22, позволяющего создавать давление в системе до 1,0 МПа и подавать сжатый воздух со скоростью до 15 м/с. Подобные установки успешно используются, например в условиях ООО «ТМК-Инокс» (г. Каменск-Уральский), с целью очистки внутренней поверхности холоднодеформированных труб от смазочного материала.

После установки оправок в каждую из заготовок обрабатываемого пакета труб осуществляется процесс волочения. Особое внимание перед волочением на самоустанавливающейся оправке следует уделить операции настройки стана в направлении более тщательного соблюдения соосности волочильного кольца с осью волочения.

При волочении труб на самоустанавливающейся оправке визуально контролируют появление пояса захвата, который является первым признаком работы оправки в равновесном режиме. После каждой операции деформации осуществляется визуальный контроль качества поверхности самоустанавливающихся оправок, при налипании металла производят зачистку оправок алмазной пастой.

Трубы, протянутые на промежуточный размер, подвергают следующему циклу операций в соответствии с действующей документацией: порезка головок, обезжиривание, сушка, термообработка, правка, торцовка, продувка внутренней поверхности, подбивка головок труб. После чего повторяют операцию оправочного волочения на размер согласно маршруту изготовления.

Трубы, протянутые на готовый размер, также подвергаются циклу операций, включая порезку головок, обезжиривание, сушку, термообработку, правку, торцовку, продувку внутренней поверхности и ряд операций отделки и приемки в соответствии с нормативной документацией на готовые трубы.

5.4 Разработка технологии изготовления холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм в бунтах

Более эффективным для изготовления труб малого диаметра является использование способа бунтового волочения с получением длинномерной продукции. Результаты, полученные автором в рамках проведенного диссертационного исследования, показали реалистичность использования самоустанавливающихся оправок в технологии волочения труб на прямолинейных станах и возможность ее реализации на волочильных станах барабанного типа.

Приведем особенности процесса бунтового волочения прецизионных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм применительно к имеющимся мощностям, например Синарского трубного завода [130].

5.4.1 Особенности оборудования для реализации бунтового волочения труб

Для реализации технологии бунтового оправочного волочения прецизионных труб с заданным внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм, например в условиях Синарского трубного завода, помимо имеющегося технологического оборудования потребуется комплекс следующего дополнительного оборудования:

1. Поддоны для размещения бунтов труб при проведении термической обработки в печи.

2. Волочильный стан усилием не менее 100 кН с вертикальной осью барабана и размоточным устройством. Стан должен быть оборудован механизированным захватом трубы, вертикальным барабаном диаметром 1000 мм и приводом от электродвигателя мощностью от 35 до 37 кВт, при этом целесообразным является использование асинхронного двигателя с частотным преобразователем. Скорость волочения – от 0 до 150 м/мин.

3. Устройство для заковки конца трубы. В случае заковки конца бунтовой трубы ее кантовка затруднена, а использование приема изгиба сечения трубы под прямым углом с созданием своеобразного рычага (так как это делают при волочении проволоки) может привести к искажению сечения трубы и получению впоследствии в этом месте дефектного участка на готовой трубе.

Для изготовления головок бунтовой трубы на участке бунтового волочения предлагается использовать ротационно-обжимное устройство, в котором в отличие от радиально-обжимного устройства имеется возможность обработки переднего конца трубы без его кантовки [131].

4. Установка циркуляционной промывки внутренней полости бунтовой трубы и продувки внутренней полости бунтовой трубы сжатым воздухом.

Все операции по подготовке поверхности труб в бунтах предлагается производить путем погружения их в имеющиеся ванны с соответствующими растворами для промывки, при этом одновременно для наружной и внутренней поверхности.

Обработку внутреннего канала бунта предлагается осуществлять на струйно-циркуляционных установках в виде помп, смонтированных на корпусе ванны, и комплектом герметичных насадок разного диаметра.

По окончании каждой операции остатки раствора удаляют из полости трубы продувкой сжатым воздухом.

5. Правильно-отрезной станок с размоточным устройством. Для размотки, правки и порезки бунтовой трубы готовых размеров предлагается использовать правильно-отрезной станок, например модели ИО-35Е, предназначенный для работы с прутками и трубами диаметром от 5 до 16 мм.

Среди современных устройств подобного типа можно рекомендовать правильно-отрезной станок модели «Команд 6/16».

Таким образом, требуемая площадь для организации в условиях Синарского трубного завода участка бунтового волочения составит не более 160 м².

5.4.2 Особенности технологии бунтового волочения труб

В отличие от технологии изготовления линейных труб рассматриваемого сортамента технологическая схема изготовления прецизионных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм с осуществлением заключительных операций деформации способом бунтового волочения на самоустанавливающейся оправке исключает операции волочения на удерживаемой цилиндрической оправке. Основными способами холодной деформации в предлагаемой технологии являются прокатка в один проход на действующем стане ХПТ-32 и последующее бунтовое волочение на барабанном стане. Разработанные маршруты и режимы волочения труб размерами 16,0 × вн12,0 мм и 9,0 × вн6,0 мм приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Маршруты изготовления прецизионных холоднодеформированных труб размерами 16,0×вн12,0 мм и 9,0×вн6,0 мм на барабанных станах

№ прохода	Тип оправки ¹⁾	Размеры труб, мм						Параметры формоизменения						Расчетные силовые параметры волочения		Напряжение изгиба, Н/мм ²	Коэффициент запаса прочности
		до деформации			после деформации			Абсолютное обжатие, мм		Коэффициент деформации		Коэффициент вытяжки	Степень деформации, %	Напряжение ²⁾ , Н/мм ²	Усилие, кН		
								по диаметру	по толщине стенки	по диаметру	по толщине стенки						
		D ₀	S ₀	d ₀	D ₁	S ₁	d ₁	ΔD	ΔS	μ _d	μ _s	μ	ε	σ	T		
Труба размерами 9,0×вн6,0 мм																	
1	СУ	20,0	2,50	15,0	16,0	2,20	11,6	4,0	0,30	1,27	1,14	1,44	30,6	391,8	37,3	22,7	1,33
2		16,0	2,20	11,6	13,0	1,90	9,2	3,0	0,30	1,24	1,16	1,44	30,5	385,9	25,6	18,3	1,37
3		13,0	1,90	9,2	10,5	1,65	7,2	2,5	0,25	1,25	1,15	1,44	30,8	403,4	18,5	14,6	1,32
4		10,5	1,65	7,2	8,93	1,42	6,10	1,6	0,24	1,18	1,17	1,37	27,2	349,3	11,7	12,4	1,47
Труба размерами 16,0×вн12,0 мм																	
1	СУ	20,0	2,25	15,5	15,93	1,97	12,0	4,1	0,29	1,27	1,15	1,46	31,3	396,8	34,3	23,0	1,32

¹⁾ СУ – самоустанавливающаяся оправка.
²⁾ Определено при значении коэффициента трения 0,019 (формула (3.22)).

Предельные отклонения холоднокатаной трубы-заготовки под волочение труб в бунтах следующие: по наружному диаметру – не более $+0,5/0$ мм; по толщине стенки – не более $\pm 0,1$ мм.

Следует отметить, что эффективность бунтового волочения определяется длиной исходной заготовки. Максимально возможная на сегодняшний день длина прокатываемых на стане ХПТ-32 труб составляет 16 м и определяется максимальной длиной имеющихся ванн.

Операцию нанесения смазочного материала с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с на поверхность трубы осуществляют в ванне с использованием струйно-циркуляционных установок. Последующие операции проводят на участке бунтового волочения.

Забойку, обеспечивающую фиксацию оправки, наносят на расстоянии от 150 до 160 мм от конца трубы специальным ограничителем. После чего вводят самоустанавливающуюся оправку и проталкивают ее до забойки путем подачи в полость заготовки сжатого воздуха или путем воздействия на оправку генератора импульсной нагрузки [128]. Затем способом холодной деформации осуществляют заковку головок с использованием ротационно-ковочной машины, например модели В2129.01.

Волочение трубы осуществляют на волочильном стане усилием 100 кН с вертикальным барабаном диаметром 1000 мм. Скорость волочения – 100 м/мин.

Диаметр барабана рассчитан с учетом рекомендаций, представленных в работах [25, 29, 132, 133].

Геометрические размеры и форму волок и самоустанавливающихся оправок выбирают в соответствии с рекомендациями, представленными в п. 5.1.

При волочении по данной технологии, также как и с использованием прямолинейных цепных станков, необходимо визуально контролировать появление пояса захвата, который является первым признаком работы оправки в равновесном режиме. После каждой операции деформации осуществляется визуальный контроль качества поверхности самоустанавливающихся оправок.

Диаметр свернутого бунта должен быть не более 1250 мм, высота – не более 300 мм. Для уменьшения трудоемкости последующих операций длина заднего прямого конца трубы должна составлять не более 700 мм, от точки касательной к наружному диаметру бунта.

Каждый бунт увязывается проволокой с одновременным охватом всех витков. После удаления головок, обезжиривание наружной и внутренней поверхности бунтовой трубы осуществляют в ванне с использованием струйно-циркуляционной установки. После чего проводят сушку бунта.

Термическая обработка труб в бунтах осуществляется в печи с защитной атмосферой. Максимальный диаметр бунта $D_6 = 1250$ мм при длине ролика пода печи 2250 мм обеспечивает свободное прохождение последнего по пространству печи. Высота рабочего пространства печи составляет 350 мм. При максимально возможной в настоящее время длине трубы после стана ХПТ-32 с учетом суммарного коэффициента вытяжки конечная длина бунтовой трубы будет составлять не более 65 м и обеспечит получение порядка 20 витков на барабане. Таким образом, максимальная высота бунта при наружном диаметре трубы 9,0 мм не превысит 180 мм, что также обеспечивает беспрепятственное прохождение бунта по рабочему пространству печи. При движении бунтов по роликовому поду печи целесообразно использовать специальные поддоны.

Между операциями бунтового волочения исключается операция промежуточной правки труб.

После бунтового волочения труб на готовый размер и порезки головок осуществляют операции размотки бунта, правки и порезки в размер (с припуском на торцовку) на правильно-отрезном станке, например модели ИО-35Е.

Дальнейшие операции обезжиривания наружной и внутренней поверхности, сушки, термообработки в печи с защитной атмосферой, правки, торцовки и продувки внутренней поверхности осуществляют с пакетами прямолинейных труб по действующей технологии.

Цикл операций по отделке и приемке готовой продукции проводят в соответствии с требованиями нормативной документации.

5.5 Технико-экономическая оценка возможных технологий производства труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм

При оценке целесообразности использования той или иной технологии изготовления труб важнейшими, помимо вопросов качества, являются вопросы величины расхода металла и производительности. Величина коэффициента расхода металла при изготовлении холоднодеформированных труб определяется:

- рациональным раскроем металла;
- величиной проходности, которая влияет на количество операций заковки и удаления головок на концах труб, правки, резки, термической обработки (угар металла), химической обработки;
- требованиями к готовой продукции (требования к точности размера длины трубы, количеству образцов для испытаний, допустимым дефектам и т.п.).

Переход на использование бунтового волочения не меняет требований к готовой продукции, а проектирование рационального раскроя металла упрощается, так как отсутствует необходимость определения кратности порезки трубы на промежуточных проходах. Таким образом, при сравнении двух технологических схем, основным фактором, определяющим потери металла при прочих равных условиях (припуски при раскрое труб, количество и размеры образцов, необходимых для проведения испытаний, среднестатистическое количество забракованного металла и т.п.) является прямой расход металла, связанный с необходимостью изготовления и последующего удаления закованных головок.

Для оценки влияния этого фактора проводились расчеты потерь металла при изготовлении труб размерами 16,0 × вн12,0 мм и 9,0 × вн6,0 мм. Для упрощения проектирования раскроя металла длина труб принималась равной 3,0 м. В расчетах не учитывались потери металла при отборе образцов, концевая обрезь, вырезка дефектных участков и т.п. Принималось, что величина этих потерь в обеих технологиях соизмерима. Длина отрезаемого участка закованного конца трубы принималась равной 100 мм. Результаты расчета представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Сравнительная оценка технологических схем по коэффициенту расхода металла

№ маршрута	Операция деформации	Прямолинейная труба				Бунтовая труба			
		Размеры трубы, мм	Длина трубы, м	Масса погонного метра трубы, кг	Масса отрезаемых головок, кг	Размеры трубы, мм	Длина трубы, м	Масса погонного метра трубы, кг	Масса отрезаемых головок, кг
I	ХПТ	25,0×2,50	$\frac{14,80}{4,90 \times 3}$ шт ¹⁾	1,387	–	20,0×2,50	15,60	1,079	–
	Волочение 1	18,5×2,15	7,60×3 шт ¹⁾	0,884	0,265	16,0×2,20	22,45	0,749	0,075
	Волочение 2	14,5×1,90	$\frac{11,10 \times 3}{5,50 \times 6}$ шт ¹⁾	0,604	0,181	13,0×1,90	32,20	0,520	0,052
	Волочение 3	11,5×1,65	8,05×6 шт ¹⁾	0,401	0,240	10,5×1,65	46,23	0,360	0,036
	Волочение 4	8,93×1,42	12,20×6 шт ¹⁾	0,263	0,158	8,93×1,42	63,20	0,263	0,026
	Итого	–	3,0×24 шт¹⁾	19,252²⁾	0,844	–	3,0×21 шт¹⁾	16,621²⁾	0,189
	Коэффициент расхода металла	1,0438³⁾				1,0114³⁾			
II	ХПТ	20,0×2,25	$\frac{16,90}{8,40 \times 2}$ шт ¹⁾	0,985	–	20,0×2,25	14,50	0,985	–
	Волочение 1	15,93×1,97	12,10×2 шт ¹⁾	0,678	0,198	15,93×1,97	21,20	0,678	0,099
	Итого	–	3,0×8 шт¹⁾	16,408²⁾	0,198	–	3,0×7 шт¹⁾	14,374²⁾	0,099
	Коэффициент расхода металла	1,0120³⁾				1,0068³⁾			
¹⁾ Кратность раскроя трубы; ²⁾ Теоретическая масса труб конечной длины; ³⁾ Коэффициент расхода металла определен с учетом только потерь на изготовление головок.									

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при существующих ограничениях по длине изготавливаемой трубы (волоочильный стан усилием 80 кН – до 14,0 м, ванна обезжиривания – до 16,0 м) максимальный расход металла наблюдается на более многопроходном маршруте №I. Это закономерно, поскольку количество проходов волочения и необходимость раскроя трубы обуславливают увеличение числа заковываемых концов. Анализ данных таблицы 5.5 показал, что использование бунтовой схемы волочения даже при существующих технических ограничениях позволит уменьшить величину расхода металла примерно в 3,8 раза: с 43,8 кг до 11,4 кг на тонну готовой трубы.

В однопроходных маршрутах, примером которых является маршрут №II, преимущества бунтового волочения существенно снижаются. Так, согласно данным таблицы 5.5, расход металла на обрезь головок сокращается с 12 кг до 6,8 кг на тонну готовой трубы.

В конечном итоге можно сделать вывод о том, что применение бунтового волочения наиболее эффективно при изготовлении труб с гарантированным внутренним диаметром в том случае, если в структуре заказных размеров труб по этому параметру преобладают размеры в диапазоне от 6,0 до 9,0 мм.

5.6 Выводы

1. Разработана конструкторская документация на самоустанавливающиеся оправки, предназначенные для изготовления труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм, отвечающих требованиям отечественных и зарубежных стандартов.

Рациональной принята цельнотелая твердосплавная оправка, с двумя симметрично расположенными рабочими частями. Эффективным является изготовление оправок в конструктивном исполнении по аналогии с техническим решением, разработанным автором настоящего диссертационного исследования, оформленным в виде полезной модели.

При этом рациональная профилировка оправок включает следующие участки с определяющими их параметрами:

- вспомогательный конусный (захватный) участок (протяженностью $l_{\gamma}=l_{\psi}$ и углом γ);
- рабочий цилиндрический участок (протяженностью l_{ψ} , диаметром от d_{ψ} до $d1_{\psi}$);
- рабочий конический участок (протяженностью l_{κ} и углом $\alpha_{on}=10^{\circ}30'$ или 11°);
- бочка (протяженностью l_{σ}).

Для изготовления рассматриваемого размерного сортамента труб предложена классификация самоустанавливающихся оправок в зависимости от угла оправки α_{on} и частного обжатия по толщине стенки.

2. Определены рациональные деформационные граничные условия осуществления процесса волочения на самоустанавливающейся оправке. Результатом является разработка методики проектирования режимов и на их основе маршрутов волочения труб с использованием самоустанавливающейся оправки.

3. Разработана эффективная технология изготовления прямолинейных холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм, отвечающих требованиям как отечественных, так и зарубежных стандартов.

4. Разработана эффективная технология изготовления холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм в бунтах, отвечающих требованиям как отечественных, так и зарубежных стандартов. Решена задача по определению диаметра барабана, разработаны рациональные режимы изготовления труб с учетом величины сплющивания и пружинения бунта, приведены технические предложения по организации современного специализированного участка с рекомендациями по выбору оборудования для условий Синарского трубного завода. Разработанная технология бунтового волочения принята Синарским трубным заводом для реализации в рамках инвестиционного проекта по модернизации производства (Приложение Д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С использованием основных положений инженерного метода, а также метода конечных элементов и метода Бубного-Галеркина решена краевая задача механики сплошной среды применительно к процессу волочения на самоустанавливающейся оправке. Получена новая аналитическая зависимость для определения усилия волочения труб на самоустанавливающейся оправке, учитывающая такие наиболее значимые факторы процесса, как приращение сопротивления пластической деформации по длине очага деформации в результате упрочнения и граничные условия на контактной поверхности с волокой и самоустанавливающейся оправкой. Визуализация распределения по длине очага деформации давлений p_e и p_{on} , действующих на технологический инструмент, в виде соответствующих графических зависимостей позволяет рационально проектировать маршруты волочения, профилировку волоки и самоустанавливающейся оправки.

2. На основе численного исследования напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке определен диапазон допустимого изменения граничных условий на контактной поверхности с волокой и самоустанавливающейся оправкой, а также особенности влияния на напряженное состояние таких параметров как профилировка технологического инструмента и положение оправки в очаге деформации.

Установлено, что при разности углов волоки α_e и оправки α_{on} от 1° до 3° и отношении между коэффициентами трения на контактной поверхности с волокой f_e и оправкой f_{on} от 1,0 до 1,3 гарантированно обеспечиваются условия равновесия самоустанавливающейся оправки.

3. Разработанная аналитическая модель напряженного состояния процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке реализована в виде программного продукта, адаптированного для инженерного персонала, и внедрена в рабочий процесс инженерно-технических служб Синарского трубного завода с целью повышения оперативности и эффективности расчетов в производственных

условиях. Также методика расчета внедрена в учебный процесс подготовки студентов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ», обучающихся по направлению «Металлургия», специальность «Обработка металлов давлением».

4. Уточнена зависимость для расчета длины участка дополнительного обжатия по толщине стенки, длины цилиндрического и конического участков самоустанавливающейся оправки.

5. Уточнены эмпирические зависимости сопротивления пластической деформации трубных сталей марок 35 и 12Х1МФ от степени деформации при холодной обработке металлов давлением, позволяющие проектировать рациональные режимы волочения.

6. Исследованы трибологические параметры используемых при волочении современных смазочных материалов: определена взаимосвязь вязкости и коэффициента трения.

Показано, что эффективным для уменьшения силовых параметров деформации и обеспечения благоприятных условий трения на контактных поверхностях при реализации процесса волочения на самоустанавливающейся оправке является использование смазочного материала с вязкостью 0,1 Па·с.

Получена новая эмпирическая зависимость изменения коэффициента трения от скорости волочения для смазочного материала с вязкостью 0,1 Па·с, позволяющая определять рациональные скоростные режимы волочения.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований определены резервы повышения производительности процесса волочения не менее чем на 10 % за счет эффективного использования ресурса смазочных материалов.

7. Установлено влияние интенсивности изменения вязкости смазочного материала от температуры по длине очага деформации на условия обеспечения равновесного положения самоустанавливающейся оправки.

8. Выявлено, что положение оправки в очаге деформации в процессе волочения определяется скоростью волочения: с увеличением скорости волочения и соответственно с уменьшением коэффициента трения оправка занимает положение близкое к крайнему заднему.

9. В результате промышленной реализации в условиях Синарского трубного завода способа волочения на самоустанавливающейся оправке изготовлена опытная партия труб размерами $16,0 \times \text{вн.} 12,0$ мм, удовлетворяющая требованиям DIN EN 10305-1.

Показано, что осуществление процесса волочения по приведенным рекомендуемым режимам деформации и при использовании рекомендуемой профилировки инструмента, позволяет гарантированно получить трубы с внутренним диаметром в диапазоне предельных отклонений, требуемых нормативной документацией, в том числе и зарубежными стандартами.

10. На основе обобщения результатов математического и физического моделирования выявлены рациональные режимы деформации труб способом волочения на самоустанавливающейся оправке и непосредственно рациональные параметры профилировки оправок.

Также выявлены определяющие признаки унификации самоустанавливающихся оправок: угол α_{on} и длина l_k конусного участка в зависимости от величины обжатия по толщине стенки ΔS . На основе указанных признаков впервые приведена классификация профилеразмеров самоустанавливающихся оправок, рекомендуемых для изготовления стальных прецизионных труб с заданным внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм, удовлетворяющих требованиям как отечественных, так и зарубежных стандартов.

11. Разработан и запатентован способ волочения на самоустанавливающейся оправке, регламентирующий режим перемещения оправки в полости трубы до головки, и таким образом обеспечивающий повышение производительности процесса волочения до 10 %.

12. На основе технических решений и результатов диссертационного исследования разработана высокопроизводительная технология изготовления прямолинейных труб и труб в бунтах, удовлетворяющих требованиям как отечественных, так и зарубежных стандартов. Разработанная технология рекомендована к внедрению на Синарском трубном заводе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечаева, А.В. О деформации толстостенной трубы в режимах сверхпластичности / А.В. Нечаева // Математическое моделирование в естественных науках: тезисы докладов XX Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов, Пермь. – Пермь: [б.и.], 2011. – С. 69.
2. Грешнов, В.М. Физико-феноменологическая модель пластичности для решения задач обработки металлов давлением / В.М. Грешков, И.В. Патяева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – №10. – С. 13-20.
3. Pospiech, J. A mathematical model for implementing a new drawing technology / J. Pospiech // Wire Journal International. – 2004. – №846. – P. 438-439.
4. Воронцов, А.Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твердого тела и ее технологических приложений. Условие пластичности: описание упрочнения и связи между напряжениями и деформациями / А.Л. Воронцов // Производство проката. – 2010. – №6. – С. 2-11.
5. Клемперт, Е.Д. Экспериментальное исследование процесса заковки концов труб перед волочением / Е.Д. Клемперт, Р.М. Голубчик, К.Е. Ушверидзе // Сталь. – 2002. – №1. – С. 61-63.
6. Ушверидзе, К.Е. Напряженно-деформированное состояние при радиальной заковке концов трубчатых заготовок / К.Е. Ушверидзе // Проблемы сварки и технической диагностики: сборник трудов Международного научно-технического семинара, Тбилиси. – Тбилиси: [б.и.], 2003. – С. 74-84.
7. Карамышев, А.П. Определение рациональной формы сечения переднего конца трубной заготовки для проведения процесса волочения / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин [и др.] // Metallurg. – 2011. – №4. – С. 67-69.
8. Сергеев, Ю.А. Анализ моделирования процесса волочения круглых изделий в конечно-элементном комплексе DEFORM-2D / Ю.А. Сергеев, С.Ю. Колесникова // Королёвские чтения: тезисы докладов Международной молодежной конференции, Самара. – Самара: [б.и.], 2011. – С. 202-203.

9. Карамышев, А.П. Подготовка концов труб перед волочением на радиально-ковочной машине AVS / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин [и др.] // *Металлург.* – 2008. – №9. – С. 52-59.

10. Паршин, В.С. Холодное волочение труб / В.С. Паршин, А.А. Фотов, В.А. Алешин. – М.: *Металлургия*, 1979. – 240 с.

11. New developments in tube drawing // *Metallurgical Plant and Technology International.* – 1991. – №1. – P. 88-90.

12. Pat. 6865918 USA, IPC B 21 B 17/14. Tube compressing roller die / W. Woldrop. – №10/349209; filed 21.01.2003; date of patent 15.03.2005.

13. Харитонов, В.В. Малооперационная технология производства особотолстостенных подшипниковых труб малого диаметра / В.В. Харитонов, А.А. Богатов // *Металлург.* – 2004. – №7. – С. 44-48.

14. Pat. 7290424 USA, IPC B 21 C 1/26. Push bench method for manufacturing small diameter tubing / P. Fullerton, N. Roden, D. Witt. – №11/038807; filed 19.01.2005; date of patent 06.11.2007.

15. Вершигора, С.М. Совершенствование технологии и эксплуатации волочильного инструмента из твердых сплавов / С.М. Вершигора, Е.А. Пудов, А.М. Павлов [и др.] // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2002. – №11. – С. 52-54.

16. Пат. 2405061 Российская Федерация, МПК С 23 С 14/32, С 23 С 14/06. Способ поверхностной обработки вольфрамкобальтового твердосплавного инструмента / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских. – №2009126395/02; заявл. 09.07.2009; опубл. 27.11.2010, Бюл. №33.

17. Баранов, А.А. Ванадирование инструмента для холодного волочения труб / А.А. Баранов, Цзянь Ли, В.И. Алимов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1990. – №1. – С. 79-81.

18. Македонов, С.И. Повышение качества холоднодеформированных труб окислением поверхности оправок / С.И. Македонов, В.М. Штанько // *Новые технологические процессы прокатки, интенсифицирующие производство и*

повышающие качество продукции: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции, Челябинск. – Челябинск: ЧПИ, 1989. – Ч.2. – С. 112.

19. Безокислительная очистка и пассивация стальной проволоки // Новости черной металлургии за рубежом. – 2001. – №2. – С. 99.

20. Пат. 2271890 Российская Федерация, МПК В 21 С 9/00. Способ подготовки поверхности длинномерной цилиндрической заготовки к волочению и устройство для его осуществления / С.А. Кузнецов, Э.А. Гарбер, А.И. Виноградов [и др.]. – №2004102019/02; заявл. 22.01.2004; опубл. 20.03.2006, Бюл. №8.

21. Жучков, С.М. Энергосберегающий и экологически чистый участок подготовки металла для холодной деформации в профили простых и сложных сечений / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, К.Ю. Ключников // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2009. – №11. – С. 58-61.

22. Соколовский, В.И. Новые технологии и машины для производства холодно-деформированных труб и изделий / В.И. Соколовский // Сталь. – 2008. – №9. – С. 60-62.

23. Pat. 63194815 Japan, IPC В 21 С 1/34. Cold drawing apparatus for metal pipe / N. Masayuki, T. Kazuo, C. Sadahiro [et al.]. – №19870029120; filed 10.02.1987; date of patent 12.08.1988.

24. Влияние кривизны заготовки на прямизну продукта волочения // Новости черной металлургии за рубежом. – 2002. – №3. – С. 110.

25. Шапиро, В.Я. Бухтовое волочение труб / В.Я. Шапиро, В.И. Уральский. – М.: Металлургия, 1972. – 264 с.

26. Биск, М.Б. Холодная деформация стальных труб. В 2 ч. Ч. 1. Подготовка к деформации и волочение / М.Б. Биск, И.А. Грехов, В.Б. Славин. – Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1976. – 232 с.

27. Савин, Г.А. Волочение труб / Г.А. Савин. – М.: Металлургия, 1993. – 336 с.

28. Савин, Г.А. Производство стальных труб на барабанных станах с применением плавающей оправки / Г.А. Савин, П.И. Орро, О.Н. Савченко [и

др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1971. – №3. – С. 30-33.

29. Биск, М.Б. Волочение труб на самоустанавливающейся оправке / М.Б. Биск, В.В. Швейкин. – М.: *Металлургиздат*, 1963. – 128 с.

30. Шевакин, Ю.Ф. Машины и агрегаты производства стальных труб / Ю.Ф. Шевакин. – М.: *Интермет Инжиниринг*, 2007. – 388 с.

31. А.с. 263548 СССР, МПК В 21 С 3/16. Самоустанавливающаяся оправка для волочения труб / В.И. Бояркин. – №1304886/22-2; заявл. 11.11.1969; опубл. 10.11.1970, Бюл. №8.

32. А.с. 1616745 СССР, МПК В 21 С 3/16. Оправка для волочения труб / В.С. Паршин, В.И. Плетнев, Г.П. Моисеев [и др.]. – №4674229/31-02; заявл. 10.02.1989; опубл. 30.12.1990, Бюл. №48.

33. А.с. 531585 СССР, МПК В 21 С 3/16. Самоустанавливающаяся оправка для протягивания труб через волоку / Ф.А. Данилов, А.А. Фотов, В.Н. Дуев [и др.]. – №2080509/02; заявл. 02.12.1974; опубл. 15.10.1976, Бюл. №38.

34. Pat. 6372419 Japan, IPC В 21 С 3/16. Mandrel drawing method for tube / К. Matsuichi, К. Koichi, I. Junji – №19860214686; filed 11.09.1986; date of patent 02.04.1988.

35. А.с. 1821260 СССР, МПК В 21 С 3/16, В 21 С 1/24. Инструмент для волочения труб / Г.А. Сизоненко, В.Д. Носарь, И.П. Шмырев. – №4934706/27; заявл. 04.03.1991; опубл. 15.06.1993, Бюл. №22.

36. А.с. 316490 СССР, МПК В 21 С 1/24. Способ волочения труб на самоустанавливающейся оправке / Ю.Ф. Шевакин, Ю.К. Дозорцев, В.А. Кондриков [и др.]. – №1370029/22-2; заявл. 16.10.1969; опубл. 07.10.1971, Бюл. №30.

37. А.с. 551071 СССР, МПК В 21 С 1/24, В 21 С 3/16. Способ задачи самоустанавливающейся оправки в очаг деформации / В.И. Соколовский, В.С. Паршин, А.М. Антимонов [и др.]. – №2132951/02; заявл. 11.05.1975; опубл. 25.03.1977, Бюл. №11.

38. А.с. 703173 СССР, МПК В 21 С 1/24. Самоустанавливающаяся оправка для волочения труб / А.И. Лобанов, И.П. Шмырев, О.И. Савченко [и др.]. – №2484188/22-02; заявл. 10.05.1977; опубл. 15.12.1979, Бюл. №46.

39. А.с. 632425 СССР, МПК В 21 С 3/16. Самоустанавливающаяся оправка для волочения труб / Г.И. Гуляев, В.М. Друян, В.Ф. Балакин [и др.]. – №2455759/22-02; заявл. 23.02.1977; опубл. 15.11.1978, Бюл. №42.

40. А.с. 1042833 СССР, МПК В 21 С 1/02. Устройство для бухтового волочения труб на самоустанавливающейся оправке / А.М. Антимонов, Р.М. Толстикова, В.А. Алешин [и др.]. – №3398526/22-02; заявл. 17.12.1981; опубл. 23.09.1983, Бюл. №35.

41. Пат. 2121403 Российская Федерация, МПК В 21 С 3/16, В 21 С 1/24. Устройство для установки самоустанавливающейся оправки при волочении труб / В.В. Яковлев, А.М. Козловский, В.Р. Федорин. – №97118237/02; заявл. 05.11.1997; опубл. 10.11.1998.

42. Pat. 3150384 Bundesrepublik Deutschland, IPC В 21 С 3/16. Anordnung zum Einbringen eines fliegenden Ziehstopfens. – №P3150384.5-14; Anmeldetag 15.12.1981; Veröffentlichungstag der Patenterteilung 08.01.1987.

43. А.с. 496066 СССР, МПК В 21 С 1/24, В 21 С 45/00. Способ волочения труб на самоустанавливающейся оправке / В.И. Соколовский, В.С. Паршин, А.М. Антимонов [и др.]. – №2041598/22-02; заявл. 08.07.1974; опубл. 25.12.1975, Бюл. №47.

44. А.с. 626851 СССР, МПК В 21 С 1/24, В 21 С 3/16. Самоустанавливающаяся оправка для волочения труб / В.Н. Мошкин, М.Д. Дубровкин, В.П. Греков. – №2476665/22-02; заявл. 15.04.1977; опубл. 05.10.1978, Бюл. №37.

45. А.с. 988397 СССР, МПК В 21 С 3/16, В 21 С 45/00. Самоустанавливающаяся оправка для волочения труб / А.М. Антимонов, В.И. Соколовский, Г.В. Дубонос [и др.]. – №3300405/22-02; заявл. 12.06.1981; опубл. 15.01.1983, Бюл. №2.

46. Влияние шероховатости поверхности протягиваемой заготовки и влагопоглощения смазки на ее свойства при волочении // Новости черной металлургии за рубежом. – 2004. – №5. – С. 64.

47. Ламин, А.Б. Повышение качества электросварных холоднодеформированных труб / А.Б. Ламин, Н.Г. Манохина, А.В. Аранович [и др.] // Сталь. – 2004. – №7. – С. 55-58.

48. Десятирикова, Н.А. Пути совершенствования технологии холоднодеформированных труб, имеющих высокие требования к чистоте поверхности / Н.А. Десятирикова, А.В. Курохтин // Металлургия XXI века: сборник трудов III Международной конференции молодых специалистов, Москва. – М.:ВНИИМЕТМАШ, 2007. – С. 471-475.

49. Щедрин, А.В. Повышение эффективности методов комбинированного волочения за счет регулирования микрогеометрии поверхности инструмента / А.В. Щедрин, В.М. Скоромнов, В.В. Ульянов [и др.] // Производство проката. – 2004. – №12. – С. 25-29.

50. Серебряков, Ал.В. Прецизионные трубы из коррозионно-стойкой стали с субмикронной чистотой поверхности канала / Ал.В. Серебряков, А.А. Богатов, Ан.В. Серебряков [и др.] // V Конгресс прокатчиков: сборник трудов, Череповец. – М.: Черметинформация, 2004. – С. 370-371.

51. Панфилов, Р.Г. Волочение тонкостенных труб из двухслойных материалов с утонением стенки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Панфилов Родион Геннадиевич. – Тула, 2006. – 160 с.

52. Тумбина, В.П. Оптимизация состава волочильной смазки для изготовления качественной проволоки / В.П. Тумбина, Б.М. Лебошкин, В.Я. Чинокалов [и др.] // Сталь. – 2006. – №6. – С. 95-96.

53. Внедрение новых видов волочильных смазок // Информация руководителю. – 2005. – №3. – С. 24.

54. Манюхина, Н.Г. Совершенствование оборудования, инструмента и технологических средств для волочения высококачественных прямошовных труб:

автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Манюхина Наталья Григорьевна. – М., 2002. – 23 с.

55. Покрас, И.Б. Исследование течения вязкопластической смазки на входе в очаг деформации при волочении / И.Б. Покрас, К.В. Кулаков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №4. – С. 38-41.

56. Гурьянов, Г.Н. Течение смазки в цилиндрическом пояске волокни / Г.Н. Гурьянов // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: сборник научных трудов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. – Вып.2. – С. 53-60.

57. Колмогоров, Г.Л. О реализации условий улучшенного (смешанного) режима трения при волочении / Г.Л. Колмогоров, В.Б. Филиппов, Т.В. Латышева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – №2. – С. 19-21.

58. Шапиро, В.Я. Применение самоустанавливающейся оправки для волочения труб / В.Я. Шапиро. – М.: Цветметинформация, 1963. – 92 с.

59. Серебряков, Ан.В. Технология производства холоднодеформированных труб из углеродистой стали / Ан.В. Серебряков, Е.Л. Шумин, Ал.В. Серебряков [и др.] // Металлург. – 2004. – №5. – С. 42-44.

60. Адсорбция влаги и способность к волочению стальной проволоки // Новости черной металлургии за рубежом. – 2002. – №3. – С. 109.

61. Комаишко, С.Г. Опыт применения смазки на основе жидкого стекла и графита при волочении / С.Г. Комаишко, Г.Н. Кулик // Металлообработка. – 2009. – №4. – С. 41-43.

62. Стасовский, Ю.Н. Организационно-технологическая схема производства прецизионных труб целевого назначения в условиях мини-производства / Ю.Н. Стасовский, И.Н. Лукаш // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – №6. – С. 59-65.

63. А.с. №1214743 СССР, МПК С 10 М 169/04. Смазка для холодного волочения металлов / В.Н. Колесников, П.И. Чуйко, В.Д. Носарь [и др.]. – №3792802/23-04; заявл. 24.09.1984; опубл. 28.02.1986, Бюл. №8.

64. Шолом, В.Ю. Перспективный технологический смазочный материал для волочения труб из высоколегированных и коррозионно-стойких сталей / В.Ю. Шолом, Д.Г. Тюленев, Ф.Н. Фазлиахметов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – №5. – С. 23-26.

65. Носарь, В.Д. Жидкие технологические смазки для волочения на короткой оправке прецизионных стальных труб / В.Д. Носарь, В.П. Сокуренок, О.Н. Савченко [и др.] // Сталь. – 1993. – №8. – С. 56-58.

66. А.с. 1585353 СССР, МПК С 21 D 9/08. Способ изготовления труб / Ю.П. Гуль, А.Н. Лещенко, В.В. Кириченко. – №4459029/31-02; заявл. 12.07.1988; опубл. 15.08.1990, Бюл. №30.

67. А.с. 435877 СССР, МПК В 21 С 9/00, В 21 С 3/16. Устройство для нанесения слоя смазки на внутреннюю поверхность трубы / И.М. Павлов, В.И. Суздальницкий, Н.М. Саксонов. – №1829464/22-2; заявл. 21.09.1972; опубл. 15.07.1974, Бюл. №26.

68. А.с. 416124 СССР, МПК В 21 С 3/16. Самоустанавливающаяся оправка для бухтового волочения труб / А.В. Анисимов, В.А. Ишунькин, Ю.В. Мосягин [и др.]. – №1712736/22-2; заявл. 09.11.1971; опубл. 25.02.1974, Бюл. №7.

69. А.с. 274771 СССР, МПК В 21 С 3/16. Оправка для волочения труб / С.И. Орлов, В.Л. Колмогоров, Ю.А. Поповцев [и др.]. – №1204344/22-2; заявл. 16.12.1967; опубл. 25.07.1973, Бюл. №31.

70. А.с. 546405 СССР, МПК В 21 С 3/16. Оправка для волочения труб / С.И. Паршаков, В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов [и др.]. – №2143041/02; заявл. 09.06.1975; опубл. 15.02.1977, Бюл. №6.

71. Каргин, Б.В. Исследование волочения труб с внутренним спиральным рифлением на короткой вращающейся оправке / Б.В. Каргин, В.Р. Каргин, Т.С. Пастушенко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – №2. – С. 30-32.

72. Щедрин, А.В. Перспективные методы комбинированного волочения / А.В. Щедрин, В.В. Ульянов, В.М. Скоромнов [и др.] // Производство проката. – 2007. – №10. – С. 25-28.

73. Собачкин, В.В. Моделирование трения при волочении трубы на самоустанавливающейся оправке / В.В. Собачкин, В.М. Душкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – №2. – С. 17-19.

74. Рубин, Г.Ш. Системный подход к решению задач обработки металлов давлением / Г.Ш. Рубин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2006. – №4. – С. 113-115.

75. Логинов, Ю.Н. Теплопередача в системе «волока – заготовка – оправка» при волочении капиллярных медных труб / Ю.Н. Логинов, М.С. Шалаева // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Екатеринбург. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 76-79.

76. Логинов, Ю.Н. Исследование соотношения деформаций при волочении толстостенных и тонкостенных медных труб / Ю.Н. Логинов, М.С. Шалаева, А.С. Овчинников // Производство проката. – 2011. – №7. – С. 31-35.

77. Богатов, А.А. Исследование периодического волочения труб методом конечных элементов / А.А. Богатов, Г.А. Орлов, А.А. Пупышев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – №3. – С. 49-55.

78. Логинов, Ю.Н. Формоизменение одиночно расположенной поры в круглой заготовке при волочении / Ю.Н. Логинов, К.В. Еремеева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – №4. – С. 3-8.

79. Kazunari, Y. Mandrel drawing and plug drawing of shape-memory-alloy fine tubes used in catheters and stents / Y. Kazunari, F. Hiroaki // Materials Processing Technology. – 2004. – №153-154. – P. 145-150.

80. Сарваров, А.С. Разработка математической модели системы ТРН-АД для моделирования процессов на волочильном стане / А.С. Сарваров, А.С. Макурин //

Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2005. – Вып.1. – С. 45-49.

81. Радионов, А.А. О повышении энергоэффективности процесса волочения проволоки средствами автоматизированного электропривода / А.А. Радионов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – №1. – С. 108-111.

82. Палтиевиц, А.Р. Получение изделий с заданным комплексом механических свойств в процессах обработки металлов давлением с применением методов математического моделирования / А.Р. Палтиевиц // Технология машиностроения. – 2008. – №8. – С. 60-63.

83. Гуляев, Ю.Г. Анализ условий формирования поперечной разностенности при волочении труб на короткой удерживаемой оправке / Ю.Г. Гуляев, В.М. Друян, Е.И. Шифрин [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2003. – №4. – С. 54-62.

84. Орлов, Г.А. Моделирование показателей качества холоднодеформированных труб / Г.А. Орлов // Теория и технология процессов пластической деформации – 2004: тезисы докладов Международной научно-технической конференции, Москва. – М.: МИСиС, 2004. – С. 199-200.

85. Гурьянов, Г.Н. Инженерные методики определения осевого напряжения при волочении круглых профилей / Г.Н. Гурьянов // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвузовский сборник научных трудов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2005. – Вып.32. – С. 46-56.

86. Rubio, E.M. Energetic analysis of tube drawing process with fixed plug by upper bound method / E.M. Rubio, C. Gonzalez, M. Marcos [et al.] // Materials Processing Technology. – 2006. – №1-3 (177). – P. 175-178.

87. Колмогоров, Г.Л. Остаточные напряжения при волочении труб / Г.Л. Колмогоров, Н.В. Никитина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – №2. – С. 26-28.

88. Носов, А.Д. Моделирование режимов волочения калиброванной стали / А.Д. Носов, А.Г. Корчунов, В.В. Андреев [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – №2. – С. 49-51.

89. Харитонов, В.А. Оптимизация параметров процесса волочения с применением генетических алгоритмов / В.А. Харитонов, М.В. Зарецкий А.М. Новикова // Материалы 66 Научно-технической конференции: сборник докладов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2008. – Т.2. – С. 127-129.

90. Карлушенко, В.П. Определение усилия волочения круглых профилей / В.П. Карлушенко, В.М. Золотарев, С.В. Бузько [и др.] // Кабели и провода. – 2008. – №2. – С. 22-26.

91. Колмогоров, Г.Л. Оптимизация технологических параметров волочильного производства / Г.Л. Колмогоров, Т.В. Латышева, В.Б. Филиппов // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвузовский сборник научных трудов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2006. – Вып.34. – С. 105-110.

92. Гурьянов, Г.Н. Неравномерность деформации при осесимметричном волочении / Г.Н. Гурьянов // Процессы и оборудование металлургического производства: Межрегиональный сборник научных трудов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2006. – Вып.7. – С. 224-229.

93. Гурьянов, Г.Н. Расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске волокна по различным методикам / Г.Н. Гурьянов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – №11. – С. 37-41.

94. Добров, И.В. Влияние сил инерции на энергосиловые параметры процесса волочения / И.В. Добров, В.И. Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – №3. – С. 48-52.

95. Харитонов, В.А. Оценка скоростной неоднородности деформации при волочении в монолитной волоке / В.А. Харитонов, С.М. Головизин // Производство проката. – 2010. – №3. – С. 14-17.

96. Гурьянов, Г.Н. Радиальная сила на волоку в зависимости от способа учета упрочнения металла и основных параметров деформации проволоки / Г.Н. Гурьянов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – №11. – С. 7-10.

97. Guo, R.-M. Numerical solution of von Karman on elastic foundation with loading and unloading processes in material work hardening curve / Remn-Min Guo // AISTech 2015. The Iron and Steel Technology: proceedings conference and exposition, Cleveland, Ohio. – Warrendale (PA): [s.n.], 2015. – Vol. 5. – P. 2809-2822.

98. Романцев, Б.А. Применение вычислительного эксперимента для определения траектории частиц деформируемого металла / Б.А. Романцев, М.М. Скрипаленко, Г.П. Жигулев // Metallurg. – 2011. – №11. – С. 83-86.

99. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Metallurgiya, 1973. – 224 с.

100. Выдрин, В.Н. Расчет давлений и натяжений при прокатке с различным соотношением окружных скоростей рабочих валков / В.Н. Выдрин, Н.В. Судаков, Е.А. Остсемин // Тонколистовая прокатка: сборник научных трудов, Липецкий политехнический институт. – Воронеж: [б.и.], 1979. – №2. – С. 38-42.

101. Клименко, П.Л. Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации: монография / П.Л. Клименко. – Днепропетровск: Пороги, 2011. – 187 с.

102. Богатов, А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. – М.: Metallurgiya, 1984. – 144 с.

103. Осадчий, В.Я. Определение напряжения волочения при деформации трубы на плавающей оправке / В.Я. Осадчий, Н.А. Малевич // Производство проката. – 2007. – №2. – С. 38-41.

104. Малевич, Н.А. Исследование моделей напряженно-деформированного состояния металла при волочении труб и разработка методики определения

силовых параметров волочения на самоустанавливающейся оправке: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Малевич Николай Александрович. – М., 2007. – 201 с.

105. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.

106. Ерманок, М.З. Рецензия на книгу М.Б. Биска и В.В. Швейкина «Волочение труб на самоустанавливающейся оправке» / М.З. Ерманок // Сталь. – 1979. – №4. – С. 148-150.

107. Pat. 4937697 Japan, IPC B 21 C 3/16. A method for manufacturing metal tubes. – №19710032117; filed 13.05.1971; date of patent 11.10.1974.

108. Соколовский, В.И. Динамическая модель стохастического процесса стана бухтового волочения труб на самоустанавливающейся оправке / В.И. Соколовский, В.М. Душкин // Международная конференция по теории механизмов и механике машин, посвященная 100-летию со дня рождения академика И.И. Артоболевского: сборник докладов, Краснодар. – Краснодар: КубГТУ, 2006. – С. 191-192.

109. Выдрин, А.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке на основе совместного применения проекционного метода и метода конечных элементов / А.В. Выдрин, К.Ю. Яковлева // Производство проката. – 2016. – №1. – С. 26-33.

110. Выдрин, А.В. Механика сплошных сред: конспект лекций / А.В. Выдрин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 58 с.

111. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер. – М.: Мир, 1988. – 352 с.

112. Марчук, Г.И. Введение в проекционно-сеточные методы / Г.И. Марчук, В.И. Агошков. – М.: Наука, 1981. – 416 с.

113. Дукмасов, В.Г. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 214 с.

114. Поздеев, А.А. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения / А.А. Поздеев, П.В. Трусков, Ю.И. Няшин. – М.: Наука, 1986. – 232 с.

115. Шапиро, В.Я. Некоторые вопросы теории и исследования процесса волочения труб из цветных металлов и сплавов на самоустанавливающейся оправке: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Шапиро Вадим Яковлевич. – М., 1963. – 33 с.

116. Уральский, В.И. Механика очага деформации и динамика оборудования при комплексной интенсификации процессов волочения и гидропрессования: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.183/ Уральский Виктор Иванович. – М., 1970. – 45 с.

117. Антимонов, А.М. Создание, исследование и внедрение новых процессов и машин для бухтового волочения труб из стали и цветных металлов: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.05/ Антимонов Алексей Михайлович. – Екатеринбург, 1996. – 48 с.

118. Пышминцев, И.Ю. Создание комплекса оборудования для исследования и моделирования процессов деформации труб / И.Ю. Пышминцев, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко [и др.] // Трубы-2009: сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности. – Челябинск: РосНИТИ, 2009. – С. 328-331.

119. Пат. 2524298 Российская Федерация, МПК С 23 С 22/05, С 23 С 22/73. Способ химической обработки труб из углеродистых и низколегированных марок стали перед волочением / А.И. Грехов, В.С. Гончаров, А.В. Дегтярев [и др.]. – №2012124310/02; заявл. 13.06.2012; опубл. 27.07.2014. Бюл. №21.

120. Яковлева, К.Ю. Экспериментальное исследование волочения труб на самоустанавливающейся оправке / К.Ю. Яковлева, Б.В. Баричко, А.В. Выдрин [и др.] // Трубы-2014: сборник докладов XXI Международной научно-практической конференции, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности. – Челябинск: РосНИТИ, 2014. – Ч. 2. – С. 128-133.

121. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 88 с.

122. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Metallurgia, 1982. – 312 с.

123. Чертавских, А.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением / А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. – М.: Metallurgia, 1968. – 364 с.

124. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

125 122. Загиров, Н.Н. Теория обработки металлов давлением / Н.Н. Загиров, Э.А. Рудницкий. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2011. – 56 с.

126. Выдрин, А.В. Интенсификация процесса волочения за счет расширения диапазона применимости смазочного материала / А.В. Выдрин, В.И. Кузнецов, К.Ю. Яковлева // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2016. – №2(7). – С. 34-40.

127. Столетний, М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. – М.: Metallurgia, 1975. – 240 с.

128. Пат. 2545981 Российская Федерация, МПК В 21 С 1/24. Способ волочения труб (варианты) / Б.В. Баричко, К.Ю. Яковлева, В.Н. Кузнецов [и др.]. – №2013148176/02; заявл. 29.10.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. №10.

129. Пат. 134087 Российская Федерация, МПК В 21 С 3/16. Стальная монолитная самоустанавливающаяся оправка для волочения труб / К.Ю. Яковлева, Б.В. Баричко, В.Н. Кузнецов [и др.]. – №2013128698/02; заявл. 24.06.2013; опубл. 10.11.2013, Бюл. №31.

130. Яковлева, К.Ю. Разработка технологии изготовления труб с заданным внутренним диаметром 6,0-12,0 мм / К.Ю. Яковлева, Б.В. Баричко, В.Н. Кузнецов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Metallurgia». – 2015. – Т18(4). – С. 122-127.

131. Шестаков, Н.А. Технология ротационнойковки и вальцовки / Н.А. Шестаков, А.А. Шевченко. – М.: Высшая школа, 1988. – 70 с.

132. Гильденгорн, М.С. Об аналитическом определении возможности применения барабана при волочении труб / М.С. Гильденгорн // Волочение на плавающей оправке: сборник трудов. – Свердловск: ЦБТИ, 1959. – С. 52-54.

133. Павлов, А.А. Волочение труб бухтовым способом / А.А. Павлов, А.Г. Прудников, В.С. Буцукин. – М.: [б.и.], 1961. – 60 с.

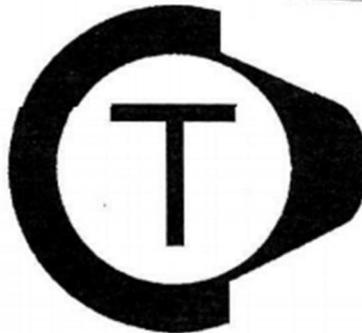
Приложение А
(обязательное)

**Технологический регламент 161-В2-1833-2013 Освоение технологии
изготовления прецизионных труб в трубоволоочильном цехе №2
с внутренним диаметром менее 12,0 мм**

Ф РИ 49-01 (А)

05.1-569
25.04.2013

ЭКЗ. № 1
КЗЛ



ОАО «СИНАРСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

ТР 161-В2-1833-2013

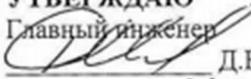
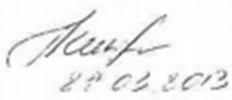
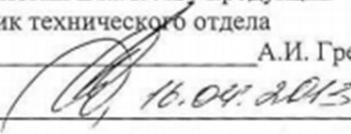
ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТРУБ
В ТРУБОВОЛОЧИЛЬНОМ ЦЕХЕ №2
С ВНУТРЕННИМ ДИАМЕТРОМ МЕНЕЕ 12 ММ

Входящий № 21-12/1-250

26 АПР 2013 *05/12-2013*

Продолжение Приложения А

Ф РИ 49-01 (Б)

		УТВЕРЖДАЮ Главный инженер  Д.В. Овчинников « 17 » 04 2013	
		Система менеджмента	ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ
		Лист 1 Листов 15	Редакция 0
ПРЕДМЕТ: ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТРУБ В ТРУБОВОЛОЧИЛЬНОМ ЦЕХЕ №2 ВНУТРЕННИМ ДИАМЕТРОМ МЕНЕЕ 12 ММ			
СОГЛАСОВАНО:			
Начальник цеха трубоволоочильного №2		 11.04.2013	В.Н. Харитонов
Главный специалист по контролю и испытаниям продукции - начальник отдела технического контроля		 11.04.2013	А.В. Ильичев
Разработчик документа, Начальник группы ЛХД ЦЗЛ		 27.03.2013	М.С. Никонов
Составил:		Проверил:	
 27.03.2013		Главный специалист по технологии и качеству продукции - начальник технического отдела  16.04.2013	
Начальник ЦЗЛ Н.Т. Тихонцева		А.И. Грехов	

Приложение Б
(обязательное)

Справка об использовании методики оценки напряженного состояния при оправочном волочении труб


УТВЕРЖДАЮ
 Главный технолог – Начальник технического
 отдела ПАО «СинТЗ», канд. техн. наук
 _____ Н.Т. Тихонцева
 « _____ » _____ 2016 г.

СПРАВКА

**об использовании методики оценки
напряженно – деформированного состояния при оправочном волочении труб**

Настоящим документом подтверждаем, что разработанная научным сотрудником ОАО «РосНИТИ» К.Ю. Яковлевой методика оценки напряженно-деформированного состояния при оправочном волочении труб использована для численного исследования эффективности использования ресурса пластичности в технологических маршрутах оправочного волочения труб в цехе В-2 ПАО «СинТЗ» в рамках научно-исследовательской работы по договору 1.21.3-П-123/14.

Разработанная К.Ю. Яковлевой методика оценки напряженно-деформированного состояния при оправочном волочении труб позволяет техническим службам цеха В-2 ПАО «СинТЗ» более корректно рассчитывать силовые параметры процесса волочения, в том числе, за счет учета реального характера упрочнения металла трубы в очаге деформации, и соответственно проектировать технологические маршруты и режимы волочения.


 _____ Е.М. Засельский
 Начальник ЦЗЛ ПАО «СинТЗ»


 _____ В.Л. Устьянцев
 Начальник лаборатории ОМД ЦЗЛ ПАО «СинТЗ»

Приложение В
(обязательное)

Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе,
д-р техн. наук, профессор

А.А. Радионов

_____ 2017 г.



АКТ

**внедрения результатов кандидатской диссертационной работы
Яковлевой Ксении Юрьевны в учебный процесс**

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов кандидатской диссертационной работы К.Ю. Яковлевой, выполненной на тему «Интенсификация процесса волочения холоднодеформированных труб на самоустанавливающейся оправке на основе комплексного моделирования».

Представленные в диссертационной работе материалы по математическому моделированию напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке используются в курсе лекций по дисциплине «Теория обработки металлов давлением», входящей в учебный план подготовки студентов, обучающихся по направлению 22.04.02 «Металлургия», профиль «Обработка металлов давлением», Южно-Уральского государственного университета (НИУ).

Заведующий кафедрой «Процессы и машины
обработки материалов давлением»,
д-р техн. наук, профессор

В.Г. Шеркунов

Декан факультета материаловедения и
металлургических технологий

М.А. Иванов

Приложение Г
(обязательное)

Рабочие чертежи самоустанавливающихся оправок для изготовления труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм

Лист 1 из 1
 Сталь 70
 ГОСТ 1050-88

Исполнение I

Исполнение II

СО-122.12.00.01

1.*Размеры для оправок.

2. Рабочие поверхности упрочнить (например азотировать) $h=0,2...0,3$ мм, HRC_3 58...62. Для остальных поверхностей HRC_3 42...48.

3. Неуказанные предельные отклонения размеров $\pm IT14/2$.

Обозначение	Исполнение	D, мм	l_{δ} , мм	l_k , мм	l_c , мм	l_f , мм
СО-122.12.00.01	I	7,8	24	4,5	6,0	6,0
-01	I	8,0	23	5,0	6,0	6,0
02	II	7,9	20	4,5	7,0	7,0
03	II	8,1	19	5,0	7,0	7,0

СО-122.12.00.01					
Оправка				Лист	Масса
самоустанавливающаяся				Лист	Листов 1
Сталь 70				ОАО РосНИТИ	
ГОСТ 1050-88				Лаборатория ВЛП	
Копировал				Формат А3	

Приложение Д
(обязательное)

**Акт о выполненной работе по освоению технологии изготовления труб
с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм**


УТВЕРЖДАЮ
 Главный технолог – Начальник технического
 отдела ПАО «СинТЗ», канд. техн. наук
 Н.Т. Тихонцева
 _____ 2016 г.

Акт
о выполненной работе по освоению технологии изготовления
прецизионных труб внутренним диаметром 6,0-12,0 мм

Освоение технологии изготовления прецизионных труб внутренним диаметром 6,0-12,0 мм выполнялось Российским научно-исследовательским институтом трубной промышленности (ОАО «РосНИТИ», г. Челябинск) в трубоволочильном цехе В-2 Синарского трубного завода (ПАО «СинТЗ», г. Каменск-Уральский) в рамках научно-исследовательской работы по договору №1.21.3-М-122/12.

Цель работы – расширение сортамента выпускаемой в цехе В-2 ПАО «СинТЗ» трубной продукции, в том числе по зарубежным стандартам.

При проектировании рациональных технологических маршрутов и режимов волочения, а также рациональной конструкции технологического инструмента использованы результаты математического моделирования процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке, полученные в рамках диссертационного исследования научного сотрудника ОАО «РосНИТИ» К.Ю. Яковлевой.

Разработанные технические решения и предложения по организации современного специализированного участка бунтового волочения труб на самоустанавливающейся оправке в условиях трубоволочильного цеха В-2 ПАО «СинТЗ» позволят усовершенствовать технологию изготовления холоднодеформированных труб с расширением прецизионных позиций сортамента, а также обеспечат снижение себестоимости изготовления за счет сокращения числа операций, трудоемкости их выполнения и экономии вспомогательных материалов и рабочего инструмента.

№ Начальник ЦЗЛ ПАО «СинТЗ»



Е.М. Засельский

Заместитель начальника технического
отдела – Начальник бюро ПАО «СинТЗ»



В.Н. Кузнецов