

На правах рукописи



Яковлева Ксения Юрьевна

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

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

Работа выполнена на кафедре «Процессы и машины обработки металлов давлением» (ПиМОМД) в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)») и в Открытом акционерном обществе «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»)

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

Официальные оппоненты:

Логинов Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Институт новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»), профессор кафедры «Обработка металлов давлением»

Головизнин Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») в г. Белорецке, заведующий кафедрой «Металлургия и стандартизация»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук» (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «24» мая 2017 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.01 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 (гл. корпус).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. (351)267-91-23, факс (351)267-92-28, e-mail: yakovleva@rosniti.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и в сети Интернет по адресу: <http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/yakovleva-kseniya-yurevna>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат
технических наук, доцент



Шабурова Наталья Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный уровень развития отечественного автомобилестроения сопровождается непрерывным увеличением спроса на холоднодеформированные трубы с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм из низколегированной углеродистой стали.

На сегодняшний день более 70 % всего объема труб с заданным внутренним диаметром производят за рубежом. В рамках реализации государственной программы импортозамещения организация производства труб малого внутреннего диаметра на базе производственных мощностей отечественных трубных компаний является стратегически важной для экономики России задачей. Увеличение спроса повышает актуальность задач по интенсификации процессов холодной деформации.

На отечественных предприятиях технология изготовления холоднодеформированных труб с заданным внутренним диаметром характеризуется использованием на заключительных операциях способа волочения на удерживаемой цилиндрической оправке или длинной оправке. Конкурентоспособность способа волочения на удерживаемой цилиндрической оправке не вызывает сомнений при изготовлении труб в сортаменте внутреннего диаметра 14,0 мм и более. Использование удерживаемой оправки для труб меньших размеров затрудняется конструктивными особенностями оправочного узла, что требует ограничения скорости волочения и приводит к уменьшению производительности. Способ волочения на длинной оправке используется отечественными производителями для изготовления еще более ограниченного сортамента, главным образом это капиллярные трубы наружным диаметром менее 3,0 мм с высокими требованиями к качеству внутренней поверхности. Фактором, сдерживающим применение длинно-оправочного волочения, является необходимость осуществления трудоемких операций по освобождению трубы от оправки, производительность которых уменьшается с увеличением диаметра труб.

Таким образом, актуальным для изготовления холоднодеформированных труб с внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм является использование способа волочения на самоустанавливающейся оправке. Эффективность данного процесса обусловлена степенью деформации за проход до 50 %, уменьшением операционного времени до 40 % при переходе с одного размера труб на другой и увеличением тем самым производительности до 15 %. Приоритетность данного способа волочения обусловлена также минимальными затратами на переоснащение существующего производства в направлении максимального использования всего комплекса действующих мощностей.

Широкое применение процесса волочения на самоустанавливающейся оправке для изготовления труб из цветных металлов не позволяет использовать имеющийся опыт для проектирования технологии изготовления стальных труб в сортаменте внутреннего диаметра от 6,0 до 12,0 мм. Во-первых, углеродистая сталь в сравнении с цветными металлами менее пластичная, что необходимо учитывать при проектировании режимов деформации. Состав и свойства применяемых смазочных материалов отличны, соответственно различны условия обеспечения равновесия самоустанавливающейся оправки, что необходимо учитывать при выборе параметров профилировки волочильного инструмента. Следует отметить, что рациональное использование современных смазочных материалов также является

одним из эффективных способов интенсификации производства. 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 ввиду увеличения обрывности.

Степень разработанности темы исследования. Освоение отечественными предприятиями технологии изготовления бесшовных труб волочением на самоустанавливающейся оправке 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 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 длиномерной трубной продукции малых размеров способ волочения на самоустанавливающейся оправке получил широкое распространение 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 решены 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 ОАО «РосНИТИ» на лабораторной установке при использовании модуля с двухвалковой прокатной клетью и волочильного модуля, оборудованного тянущим устройством барабанного типа, а также с использованием лабораторного трибометра.

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 α_s и оправки α_{on} от 1° до 3° и отношении между коэффициентами трения на контактной поверхности с волокой f_s 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 12X1МФ 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 на самоустанавливающейся оправке 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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и обозначена степень изученности тематики исследования, сформулирована цель работы и задачи исследования, описаны методы и методология исследования, приведена научная новизна полученных результатов, практическая и теоретическая значимость работы, отмечены основные положения, выносимые на защиту, раскрыта достоверность полученных результатов.

В первой главе на основе обзора научно-технической литературы представлены современные направления повышения эффективности технологии волочения и особенности граничных условий осуществления процесса волочения холоднодеформированных труб с внутренним диаметром менее 12,0 мм с использованием самоустанавливающейся оправки.

Рассмотрены конструкции самоустанавливающихся оправок, способы и устройства установки их в очаге деформации. Показаны ограничения существующих решений, связанных с малостью размеров самой оправки и ее конструктивных элементов, а также необходимости осуществления дополнительных операций, сокращающих производительность.

Показана необходимость учета колебательного характера положения самоустанавливающейся оправки в очаге деформации. В большей степени на колебания самоустанавливающейся оправки оказывают влияние условия трения на контактной поверхности. При этом актуальным является использование высокоэффективных современных смазочных материалов, определяющих скоростной режим волочения и износ инструмента, для которых информация о трибологических характеристиках мало освещена.

Установлено, что существующие математические модели описания напряженного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке не позволяют с достаточной точностью получить информацию о распределении давлений, действующих на технологический инструмент, главным образом по

причине того, что не учитывается упрочнение металла по длине очага деформации. Данный факт может привести к потере производительности при освоении новых маршрутов волочения. По этой же причине актуальным является уточнение информации о характере упрочнения углеродистых марок стали, ввиду ее неоднозначности.

На основе результатов аналитического обзора сформулирована цель и определены основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методики определения напряженного состояния при волочении на самоустанавливающейся оправке, усовершенствованной, по сравнению с известными, в том числе, за счет учета реального характера деформационного упрочнения металла.

Переход от декартовой к цилиндрической системе координат позволил свести рассматриваемую 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 (Рисунок 1).

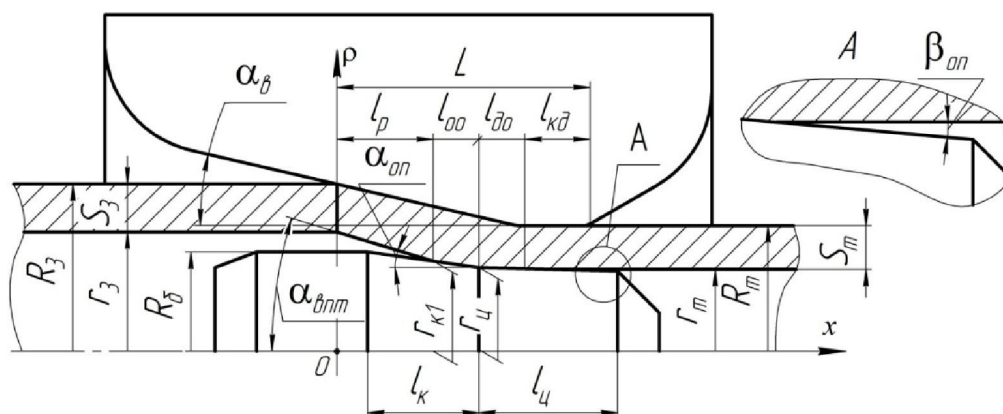


Рисунок 1 – Очаг деформации при волочении на самоустанавливающейся оправке: R_3, r_3, S_3 – наружный и внутренний радиусы и толщина стенки трубной заготовки соответственно; R_m, r_m, S_m – наружный и внутренний радиусы и толщина стенки трубы соответственно; $l_p, l_{oo}, l_{do}, l_{kd}$ – длины участков редуцирования по наружному диаметру, основного и дополнительного обжатия по толщине стенки, калибровки по наружному и внутреннему диаметрам соответственно; L – длина очага деформации; α_β – угол наклона образующей конусного участка волокна; α_{on}, β_{on} – углы наклона образующих конусного и цилиндрического участков самоустанавливающейся оправки соответственно; α_{vnm} – угол наклона образующей внутренней поверхности трубы на участке редуцирования; l_k, l_c – длины конусного и цилиндрического участков самоустанавливающейся оправки; R_β, r_u – радиусы бочки и цилиндрического участка самоустанавливающейся оправки соответственно; r_{k1} – радиус в точке начала контакта внутренней поверхности трубы с оправкой

Граничные условия трения на контакте металла с инструментом задавались согласно закону Амонтона-Кулона, при этом значения коэффициентов трения на контакте с волоком f_β и оправкой f_{on} принимались в общем случае различными.

Сопротивление металла пластической деформации σ_S , Н/мм², определялось степенной функцией:

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + a (\varepsilon)^b, \quad (1)$$

где σ_{S0} – сопротивление металла пластической деформации в недеформированном состоянии, Н/мм²; ε – степень пластической деформации, %; a, b – коэффициенты, учитывающие реологические свойства стали и определяющие интенсивность изменения σ_S . При численном анализе модели параметры σ_{S0}, a, b принимались по результатам исследований А.В. Третьякова.

С учетом осевых перемещений оправки, величина которых l_{zu} определялась по формуле В.И. Уральского и В.Я. Шапиро, уточнялись геометрические условия задания равновесного положения оправки. При этом, протяженность участка дополнительного обжатия по толщине стенки $l_{\partial o}$, мм, при условии изменения толщины стенки на участке редуцирования, определялась по следующей формуле:

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

где S_p – толщина стенки трубы в конце участка редуцирования, мм; R_{ce} – радиус скругления границы сопряжения конусного и калибрующего участков волокна, мм; k – безразмерный коэффициент положения оправки.

Координаты точки начала контакта внутренней поверхности трубы с конусом оправки определялись из условия пересечения их образующих.

Также принималось, что изменение напряженного состояния на участке редуцирования несущественно и им можно пренебречь, что не внесет значительной погрешности в конечный результат.

Таким образом, в соответствии с основными положениями инженерного метода для каждого из рассматриваемых участков контакта с оправкой, согласно схемам нагружения (Рисунок 2), получены дифференциальные уравнения равновесия проекций сил на ось волочения:

– для участка основного обжатия по толщине стенки:

$$\frac{dp_\varepsilon}{dx} - A_{oo} p_\varepsilon = B_{oo} \sigma_S - C_{oo} \frac{d\sigma_S}{dx}; \quad (3)$$

– для участка дополнительного обжатия по толщине стенки:

$$\frac{dp_\varepsilon}{dx} - A_{\partial o} p_\varepsilon = B_{\partial o} \sigma_S - C_{\partial o} \frac{d\sigma_S}{dx}; \quad (4)$$

– для участка калибровки по наружному и внутреннему диаметру:

$$\frac{dp_\varepsilon}{dx} - A_{\kappa \partial} p_\varepsilon = B_{\kappa \partial} \sigma_S - C_{\kappa \partial} \frac{d\sigma_S}{dx}, \quad (5)$$

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

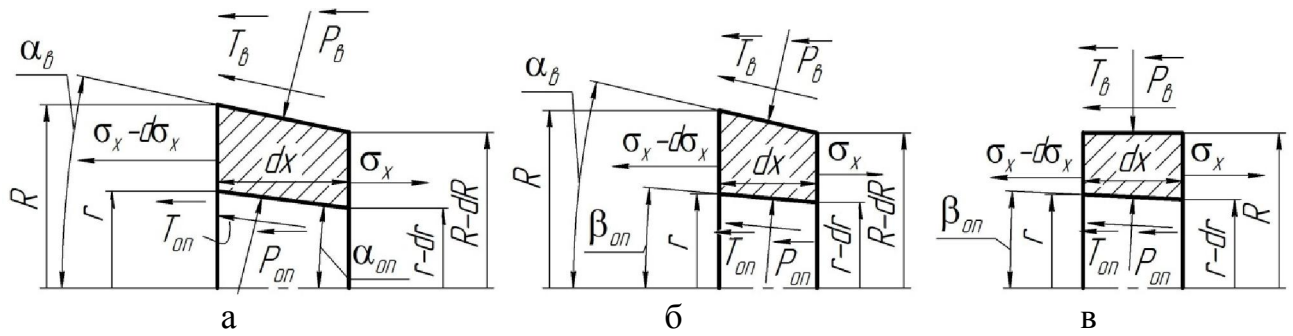


Рисунок 2 – Схемы нормальных сил P_β и P_{on} , действующих на волоку и оправку, сил трения T_β и T_{on} , действующих на контактной поверхности волоки и оправки, и продольного напряжения σ_x , приложенных к кольцевому элементу протяженностью dx , выделенному в очаге деформации на участке: а – основного обжатия по толщине стенки; б – дополнительного обжатия по толщине стенки; в – калибровки по внутреннему и наружному диаметрам

При этом для каждого из рассматриваемых участков очага деформации отношение между давлением p_β , действующим на волоку, и давлением p_{on} , действующим на оправку, полученное из условия равновесия проекций сил на ось ρ , в общем виде представлялось следующим выражением:

$$P_{on} = P_\beta \frac{F_\kappa^\beta}{F_\kappa^{on}} k_\alpha, \quad (6)$$

где F_κ^β , F_κ^{on} – площади контактной поверхности металла трубы соответственно с волокой и оправкой для рассматриваемого участка очага деформации, мм^2 ; k_α – коэффициент, учитывающий параметры профилировки волоки и оправки на соответствующем участке очага деформации.

Уравнения (3) – (5) представляют собой линейные неоднородные дифференциальные уравнения равновесия, аналитическое решение для которых затруднительно. Решение получено с привлечением метода Бубнова-Галеркина и метода конечных элементов (МКЭ), сформулированных для одномерной задачи. Дискретизация функции изменения давления $p_\beta(x)$ по длине очага деформации выполнялась с помощью 8 линейных одномерных симплекс-элементов, каждый из которых ограничивался двумя узлами. В результате применения метода конечных элементов решение поставленной краевой задачи сводилось к поиску узловых значений P_i аппроксимирующей функции, которые в наилучшей степени удовлетворяют исходным дифференциальным уравнениям равновесия (3) – (5). Для определения значений P_i с использованием метода Бубнова-Галеркина получена следующая система линейных уравнений:

$$\sum_{j=3}^8 \left\{ -P_i \left(x_i - x_{i+1} - \frac{1}{2} A^{(j)} (x_{i+1}^2 - x_i^2) \right) + P_{i+1} \left(x_{i+1} - x_i - \frac{1}{2} A^{(j)} (3x_i^2 + x_{i+1}^2) \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sigma_{s0} B^{(j)} (x_{i+1} - x_i) - B^{(j)} a 100^b \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^b \right\} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\frac{\left(-\left(\frac{2 R_{\alpha}^{(j)} x_i}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(j)} x_{i+1}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_{\alpha}^{(j)}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} (1+b)} + \right. \\
& \left. + \frac{x_i \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(j)} x_i}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b - x_{i+1} \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(j)} x_{i+1}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b}{1+b} \right] + \\
& + C^{(j)} a b 100^{b-1} \frac{200 R_{\alpha}^{(j)}}{\left(R_0^2 - r_0^2 \right)} \left(\frac{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}{R_0^2 - r_0^2} \right)^{b-1} \times \\
& \times \left[\frac{\left(-\left(\frac{2 R_{\alpha}^{(j)} x_i}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b - \left(\frac{2 R_{\alpha}^{(j)} x_{i+1}}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2} + 1 \right)^b}{\frac{2 R_{\alpha}^{(j)} b}{R_0^2 - r_0^2 - (R_0^{(j)})^2 + (r_0^{(j)})^2}} \right] \left. \right\} = 0, \quad (7)
\end{aligned}$$

где P_i, P_{i+1} – узловые значения искомой функции $p_{\epsilon}(x)$, Н/мм²; x_i, x_{i+1} – осевые координаты узлов конечных элементов по длине очага деформации, мм; R_0, r_0 – наружный и внутренний радиусы трубной заготовки, мм; $R_0^{(j)}, r_0^{(j)}$ – наружный и внутренний радиус деформируемой трубы в начале j -ого элемента, мм; $A^{(j)}, B^{(j)}, C^{(j)}$ – 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.

Для приведения полученного решения к частному виду, граничное условие, определяемое условием пластичности, принималось в виде:

$$p_{\epsilon}|_{x=x_3} = -\sigma_{S0}, \quad (8)$$

где x_3 – осевая координата начала контакта трубы с оправкой.

При численном исследовании разработанной математической модели определено, что в большей степени на изменение характера напряженного состояния оказывают влияние разность углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on}$ и значения коэффициентов трения f_{ϵ} и f_{on} . При этом наиболее чувствительным участком очага деформации является участок основного обжатия по толщине стенки, что обусловлено началом контакта оправки с трубой.

Анализ результатов численного исследования влияния профилировки волокна и самоустанавливающейся оправки на энергосиловые параметры процесса деформации, показал, что с увеличением разности углов $\alpha_{\epsilon} - \alpha_{on}$ на 1° продольное

напряжение незначительно (до 4 %) увеличивается (Рисунок 3, а), а давления интенсивно (до 30 %) уменьшаются (Рисунок 3, б). При этом для больших углов волокна α_θ характерны меньшие значения продольного напряжения и большие значения давлений. Анализируя указанные результаты, установлено, что рациональным является осуществление волочения труб при разности углов $\alpha_\theta - \alpha_{on}$ от 1° до 3° , в частности при использовании волокна с углом $\alpha_\theta = 13^\circ$ и самоустанавливающейся оправки с углом α_{on} от 10° до 12° .

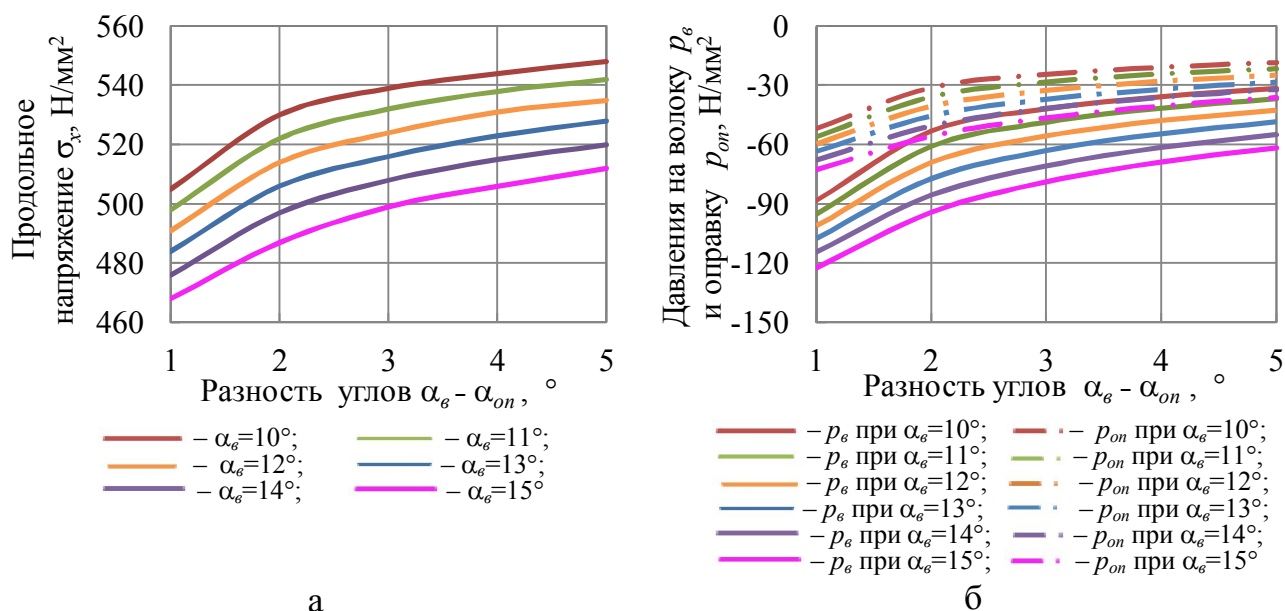


Рисунок 3 – Зависимости изменения продольного напряжения σ_x (а) и давлений p_θ , p_{on} (б) от разности углов $\alpha_\theta - \alpha_{on}$ для участка основного обжата по толщине стенки

С использованием данных результатов выполнялось исследование условия равновесия самоустанавливающейся оправки, определяемого неравенством:

$$P_i^u \leq P_i^k, \quad (9)$$

где P_i^u , P_i^k – узловые значения давлений, действующих на цилиндрический и конический участки самоустанавливающейся оправки, Н/мм².

На основе полученных результатов, определен диапазон допустимого изменения граничных значений коэффициентов трения на контактной поверхности трубы с волоком и самоустанавливающейся оправкой (Таблица 1). При этом установлено, что с уменьшением разности углов $\alpha_\theta - \alpha_{on}$ этот диапазон сужается, как и при перемещении оправки от крайнего заднего положения к крайнему переднему.

Анализ влияния отношения коэффициентов трения f_θ / f_{on} на напряженное состояние при волочении на самоустанавливающейся оправке (Рисунок 4) показал, что обеспечение значений отношения f_θ / f_{on} от 1,0 до 1,3 является рациональным с точки зрения энергосиловых параметров.

В третьей главе приведены результаты комплексного физического моделирования процесса волочения на самоустанавливающейся оправке, выполненного для подтверждения аналитических зависимостей, выявленных в процессе численного исследования разработанной математической модели.

Таблица 1 – Граничные значения коэффициентов трения на контактной поверхности трубы с волокой f_ϵ и самоустанавливающейся оправкой f_{on} при разности углов $\alpha_\epsilon - \alpha_{on} = 3^\circ$

f_{on}	f_ϵ											
	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 (9) не выполняется; знак «+» – условие (9) выполняется.

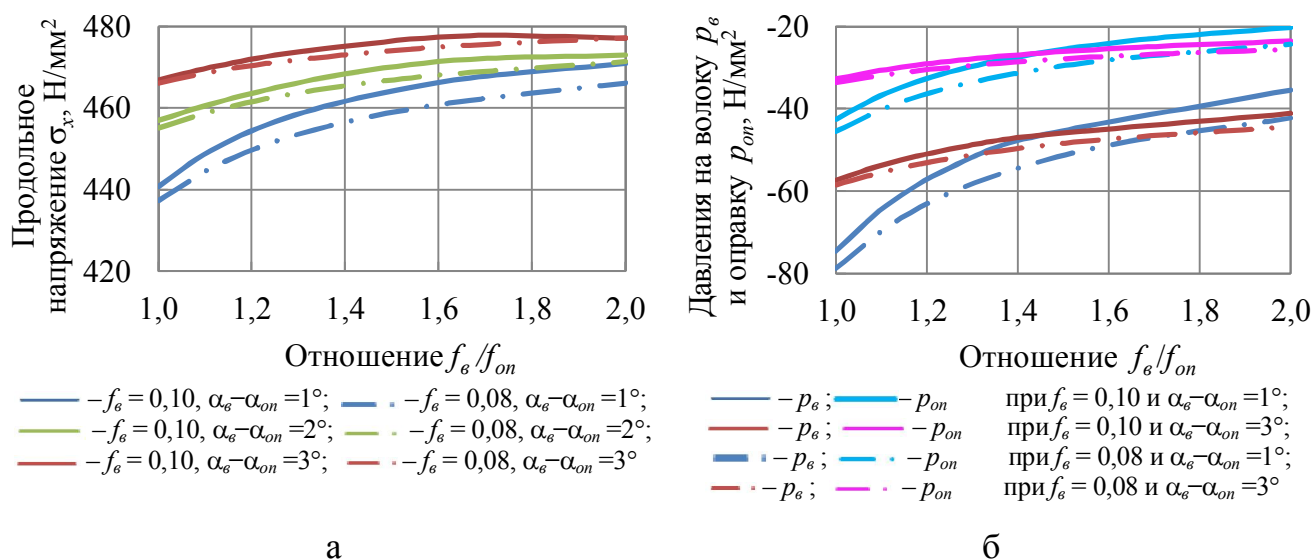


Рисунок 4 – Зависимости изменения продольного напряжения σ_x (а) и давлений p_ϵ , p_{on} (б) от отношения f_ϵ / f_{on} для участка основного обжатия по толщине стенки

На первом этапе уточнялись эмпирические зависимости изменения сопротивления пластической деформации σ_S стали марок 35 и 12Х1МФ от степени деформации ϵ при холодной обработке металлов давлением. Вид функций, описывающих экспериментальные данные (Рисунок 5), определялся на основе корреляционно-регрессионного анализа. Таким образом, получены следующие уточненные функции сопротивления пластической деформации для стали марок 35 и 12Х1МФ соответственно:

$$\sigma_S = 312 + 35,1\epsilon^{0,597} \quad (\text{при коэффициенте корреляции } R^2=0,956); \quad (10)$$

$$\sigma_S = 373 + 91,3\epsilon^{0,294} \quad (\text{при коэффициенте корреляции } R^2=0,958). \quad (11)$$

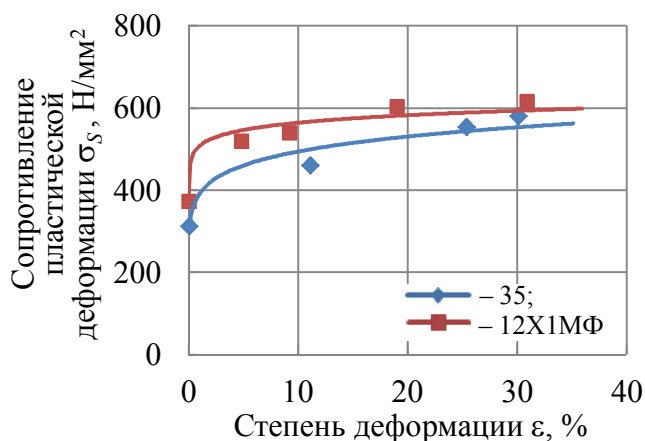


Рисунок 5 – Уточненные зависимости изменения сопротивления пластической деформации стали марок 35 и 12X1MΦ от степени деформации

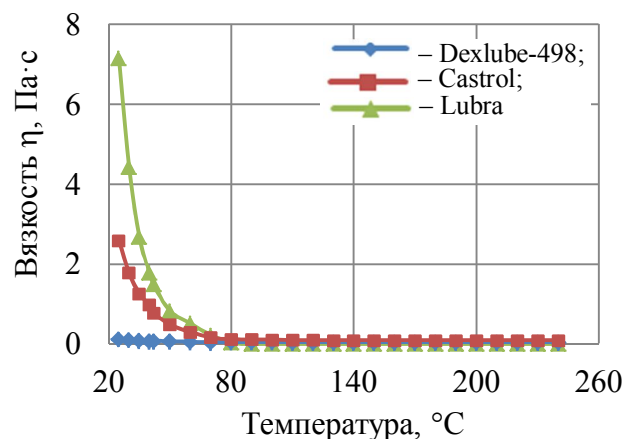


Рисунок 6 – Эмпирические зависимости изменения вязкости исследуемых смазочных материалов от температуры

На втором этапе исследовалась вязкость современных смазочных материалов, используемых в технологии оправочного волочения. Для оценки изменения вязкости смазочного материала по длине очага деформации определен характер эмпирических температурных зависимостей динамической вязкости исследуемых смазочных материалов (Рисунок 6). Аналитический вид функций, описывающих температурные зависимости динамической вязкости, определялся также с привлечением корреляционно-регрессионного анализа (Таблица 2).

Таблица 2 – Параметры температурной зависимости изменения динамической вязкости исследуемых смазочных материалов

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

Примечание – Далее по тексту исследуемые смазочные материалы обозначены по величине вязкости при температуре 25 °С.

Показано, что качественное отличие исследуемых смазочных материалов характерно для интервала температур от 25 до 80 °С. При температуре более 80 °С вязкость смазочных материалов сравнима и составляет менее 1 Па·с.

На третьем этапе проводилось экспериментальное волочение на самоустанавливающейся оправке с использованием смазочных материалов с вязкостью 0,1, 2,6 и 7,2 Па·с на примере изготовления труб размерами 9,0×вн.6,0 мм из стали марки 10 с коэффициентами вытяжки 1,41 и 1,52. При этом режимы деформации и параметры профилировки волок и оправок определялись с использованием разработанной математической модели. Таким образом, комплект технологического инструмента включал волоку с углом α_g равным 13° и самоустанавливающиеся оправки с углами α_{on} равными 8°, 9° и 10°, т.е. обеспечивалась разность углов $\alpha_g - \alpha_{on}$ соответственно 5°, 4°, 3°.

На основе анализа результатов экспериментального волочения выявлено, что вероятность нарушения равновесного положения самоустанавливающейся оправки, а именно затягивание ее за крайнее переднее положение, тем меньше, чем меньше разность углов $\alpha_g - \alpha_{on}$, вязкость смазочного материала и больше степень деформации и абсолютное обжатие по толщине стенки. Также установлено, что при прочих равных условиях, как с уменьшением разности углов $\alpha_g - \alpha_{on}$, так и с уменьшением вязкости смазочного материала, усилие волочения уменьшается, что подтверждает анализ экспериментальных осциллограмм, зафиксированных при скорости волочения 2,3 м/мин (Рисунок 7).

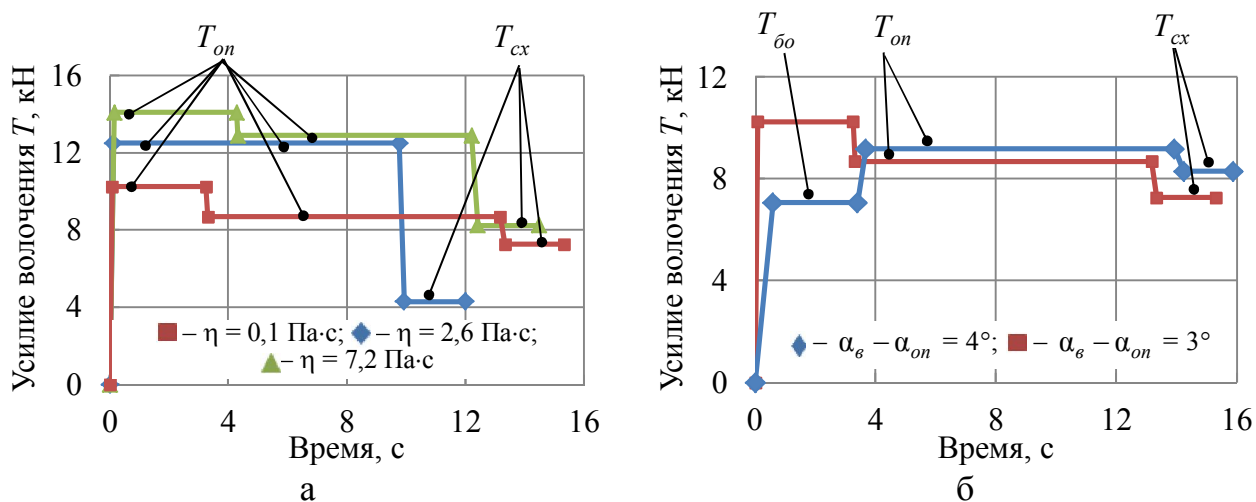


Рисунок 7 – Осциллограммы изменения усилия волочения на самоустанавливающейся оправке при разности углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$ и использовании смазочных материалов различной вязкости (а) и при разности углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$, $\alpha_g - \alpha_{on} = 4^\circ$ и использовании смазочного материала с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с (б): T_{bo} – усилие волочения в безоправочном режиме; T_{on} – усилие оправочного волочения; T_{cx} – усилие схода трубы с оправки

Также на основе анализа осциллограмм установлено, что некоторое увеличение усилия в начальный момент волочения, в сравнении с установившимся режимом, обусловлено работой самоустанавливающейся оправки в положении близком к крайнему переднему.

Инструментальный контроль наружного и внутреннего диаметров труб размерами 9,0×вн.6,0 мм показал, что режим волочения на самоустанавливающейся оправке с коэффициентом вытяжки 1,5 и при использовании комплекта инструмента, обеспечивающего разность углов $\alpha_g - \alpha_{on} = 3^\circ$, независимо от смазочного материала, позволяет обеспечить требования ГОСТ 9567 и DIN EN 10305-1 к предельным отклонениям размеров. Так фактические значения наружного и внутреннего диаметров составили соответственно 8,93 и 6,05 мм.

На основе сопоставления расчетной зависимости деформационного разогрева при волочении с эмпирической температурной зависимостью вязкости смазочных материалов (Рисунок 8) показано, что благоприятные условия обеспечения равновесного положения самоустанавливающейся оправки наблюдались для смазочного материала с меньшим значением вязкости в момент начала контакта трубы с оправкой.

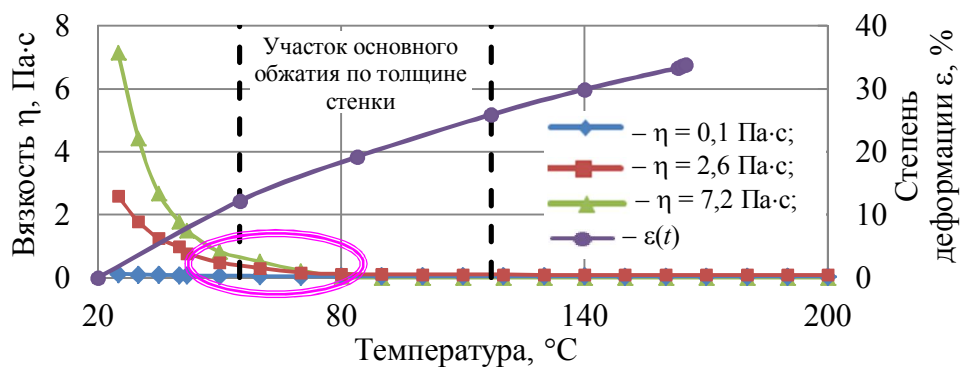


Рисунок 8 – Расчетная температурная зависимость изменения степени деформации и эмпирическая температурная зависимость вязкости исследуемых смазочных материалов по длине очага деформации

На четвертом этапе для окончательного обоснования влияния вязкости смазочного материала на режим работы самоустанавливающейся оправки и силовые условия волочения проводилось моделирование процесса трения скольжения при волочении. Постановка задачи осуществлялась с привлечением теории подобия. Исследование проводилось на трибометре, элементом трибосопряжения которого является пара «диск-палец», при пяти-, шестикратном повторении эксперимента. Результаты приведены на рисунке 9 и в таблице 3.

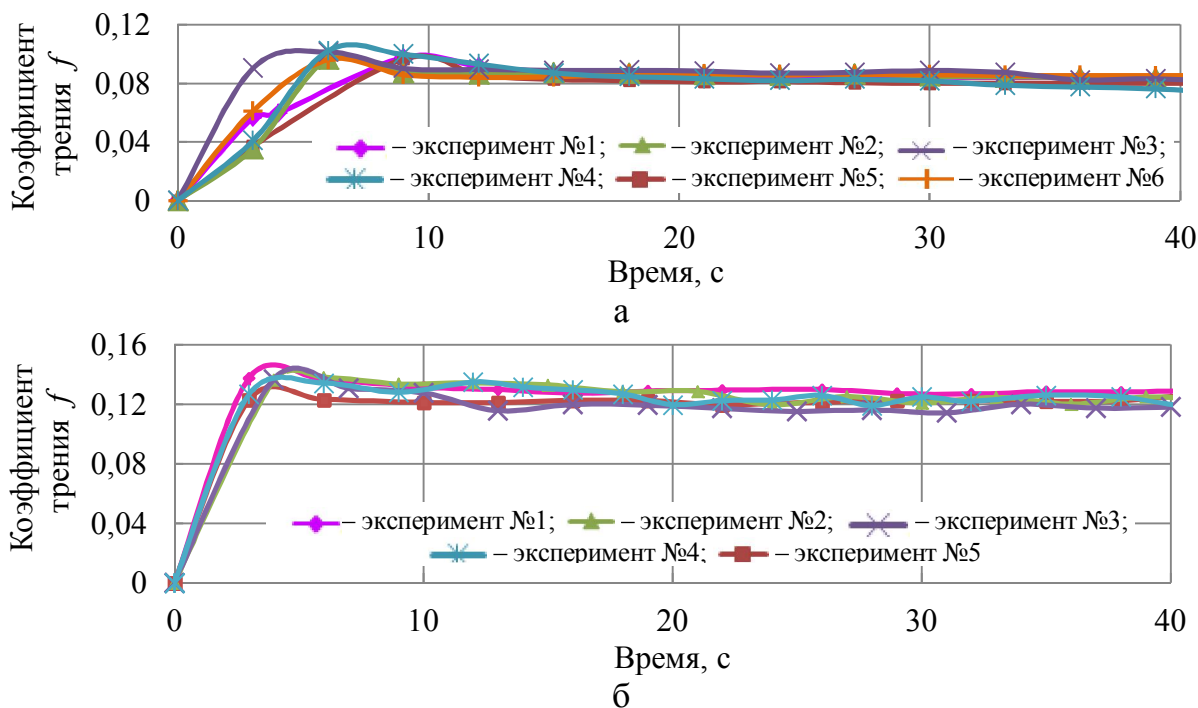


Рисунок 9 – Эмпирические кривые изменения коэффициента трения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с (а) и $\eta = 7,2$ Па·с (б)

Таблица 3 – 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	0,1246	0,1196

Анализ полученных результатов показал, что при использовании смазочных материалов с менее интенсивным характером изменения вязкости 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.

На основе результатов исследования влияния скорости скольжения на изменение коэффициента трения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с выявлено, что с увеличением скорости волочения коэффициент трения уменьшается по следующей зависимости:

$$f = 0,02 + 0,98v^{-0,912}, \quad (12)$$

где v – скорость волочения, м/мин.

Полученная зависимость позволит проектировать рациональные скоростные режимы волочения при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta=0,1$ Па·с.

С использованием результатов лабораторных исследований выполнена сравнительная оценка величины усилия, рассчитанного по разработанной математической модели, с экспериментальным значением. Показано, что погрешность составляет не более 7 %, в то время как результаты расчета по существующим моделям отличаются от фактически зафиксированной величины усилия более чем на 13 %. С учетом полученных результатов разработанная модель внедрена в рабочий процесс инженерно-технических служб Синарского трубного завода и учебный процесс подготовки студентов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ», что подтверждено соответствующими Актами.

В четвертой главе приведены результаты опытно-промышленного освоения в условиях Синарского трубного завода технологии изготовления холоднодеформированных труб размерами $16,0 \times \text{вн.} 12,0$ мм из стали марки 10 в соответствии с требованиями DIN EN 10305–1. Волочение проводилось на стане ХВТ №13 со скоростью 70 м/мин при использовании смазочного материала с вязкостью $\eta = 0,1$ Па·с.

Предварительное моделирование с использованием разработанной математической модели проводилось с учетом действующей заводской профилировки волок с углом $\alpha_g = 13^\circ$. На основе полученных результатов определен рациональный маршрут волочения: $18,50 \times \text{вн.} 14,0$ мм \rightarrow $16,0 \times \text{вн.} 12,0$ мм. Абсолютная деформация по наружному диаметру составила 2,5 мм, по толщине стенки – 0,25 мм. Коэффициент вытяжки составил 1,31. Рациональные параметры профилировки самоустанавливающейся оправки для указанных деформационных условий приведены в таблице 4, в соответствии с конструктивным исполнением на рисунке 10.

Таблица 4 – Параметры профилировки самоустанавливающейся оправки для волочения труб размерами $16,0 \times \text{вн.} 12,0$ мм в соответствии с рисунком 10

d_u , мм	α_{on} , град	β_{on} , град	D_{δ} , мм	d_x , мм	l_u , мм	l_k , мм	$l_{D\delta}$, 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

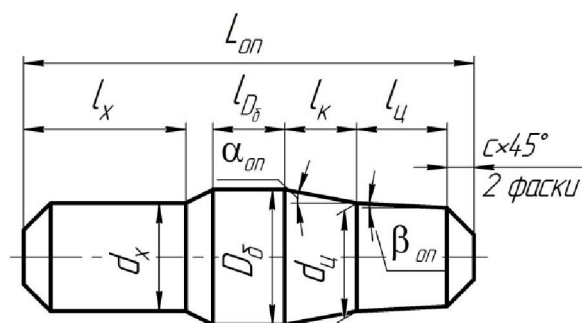


Рисунок 10 – Конструкция и профилировка проектной самоустанавливающейся оправки: l_{D_6} , l_x – длины бочки и хвостовика соответственно; $L_{оп}$ – длина оправки; c – фаска; d_u , D_6 , d_x – диаметры цилиндра, бочки и хвостовика соответственно

В результате промышленной реализации изготовлена опытная партия труб размерами $16,0 \times \text{вн.} 12,0$ мм, удовлетворяющая требованиям DIN EN 10305–1 к предельным отклонениям размеров. Однако 15 % объема партии труб было забраковано ввиду отсутствия втягивания оправки в очаг деформации и таким образом осуществления волочения в безоправочном режиме.

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 давлением, действующим на оправку по длине очага деформации (Рисунок 11), рассчитанным с использованием разработанной математической модели.

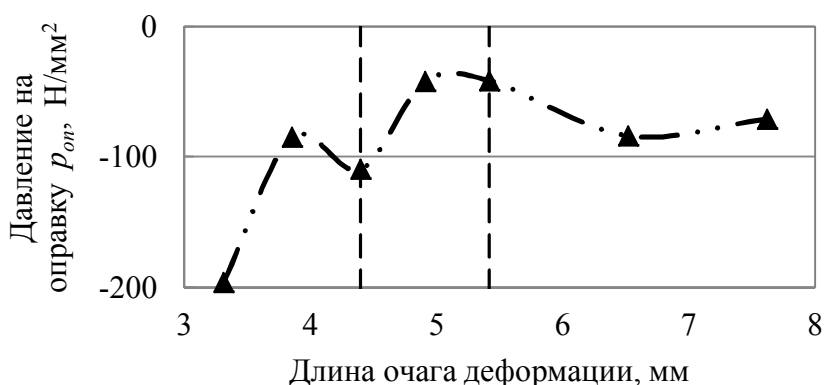


Рисунок 11 – Функция распределения давления $p_{оп}$, действующего на оправку по длине очага деформации, при волочении труб размерами $16,0 \times \text{вн.} 12,0$ мм

На основе результатов данного анализа выявлено, что оправка работала в положении близком к крайнему заднему. Сопоставляя результаты опытно-промышленного опробования с лабораторными исследованиями (где скорость волочения варьировалась от 2 до 20 м/мин) 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.

Установлено, что причинами безоправочного режима волочения являлось наличие у основания головки трубы смазочной пробки, а также отсутствие контроля режимов операции перемещения оправки в полости трубы до головки

перед волочением. Для исключения первой причины рекомендовано операцию формирования головок труб осуществлять способом холодной деформации. Для устранения второй причины и одновременного обеспечения сокращения затрат на технологический инструмент, уменьшения трудоемкости операций при подготовке труб к волочению на самоустанавливающейся оправке и увеличения производительности предложен и запатентован способ волочения труб на самоустанавливающейся оправке, согласно которому операцию задачи и перемещения оправки осуществляют:

– подачей сжатого воздуха, при величине давления воздуха P , Н/мм², определяемой по формуле:

$$P = (0,01 \div 0,02) \frac{\sigma_{S0}}{D_3} (D_3 - d_3), \quad (13)$$

где D_3 , d_3 – наружный и внутренний диаметры заготовки, соответственно, мм;

– воздействием генератора импульсной нагрузки с начальной скоростью движения оправки V , м/с, определяемой по формуле:

$$V = (55 \div 70) \frac{d_m}{D_m}, \quad (14)$$

где D_m , d_m – наружный и внутренний диаметры трубы, соответственно, мм.

В пятой главе, на основе обобщения результатов опытно-экспериментальных работ с использованием разработанной математической модели, приведены технические решения, позволяющие интенсифицировать процесс волочения труб на самоустанавливающейся оправке, и рекомендации по совершенствованию на их основе технологии изготовления холоднодеформированных труб с внутренним диаметром менее 12,0 мм.

Определена рациональная профилировка самоустанавливающейся оправки, изготовление которой осуществляют в конструктивном исполнении согласно предложенному и запатентованному способу. В таблице 5 приведены параметры профилировок самоустанавливающихся оправок, рекомендуемых для изготовления труб с внутренним диаметром менее 12,0 мм. Звено самоустанавливающейся оправки рекомендуемой профилировки приведено на рисунке 12.

Таблица 5 – Параметры рациональной профилировки самоустанавливающихся оправок для изготовления прецизионных труб с заданным внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм

Параметры профилировки										
α_{on}	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	d_1	6,0	6,0	–	4,5	5,0	–	$d1_y + 2,05$	$d1_y + 1,85$
11°	-0,05	+0,05	7,0	7,0	4,5	5,0	–	$d1_y + 2,15$	$d1_y + 2,35$	–

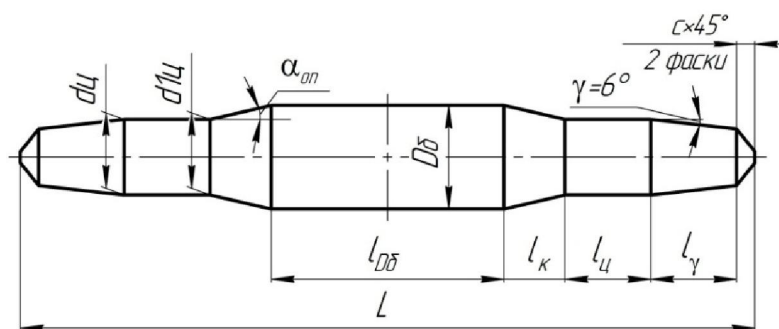


Рисунок 12 – Звено разработанной самоустанавливающейся оправки

Разработаны рациональные режимы волочения на самоустанавливающейся оправке указанной профилировки (Таблица 6).

Таблица 6 – Рациональные режимы волочения прецизионных труб с заданным внутренним диаметром от 6,0 до 12,0 мм на самоустанавливающейся оправке

Коэффициент вытяжки		Абсолютная деформация по наружному диаметру, мм		Абсолютная деформация по толщине стенки, мм, при наружном диаметре, мм		
min	max	min	max	от 8 до 10	св. 10 до 15	св. 15 до 18
Для однопроходного волочения						
1,35	1,6	2,5	5,0	0,15 – 0,20	0,20 – 0,25	0,25 – 0,35
Для n -проходного волочения						
1,35	1,5	2,5	4,0	0,15	0,20	0,25

С использованием разработанных решений подготовлены рекомендации по совершенствованию технологии изготовления холоднодеформированных труб с внутренним диаметром менее 12,0 мм, применительно к линейным и барабанным трубоволочильным станам. Разработанная технология рекомендована к внедрению на Синарском трубном заводе, о чем имеется соответствующий Акт.

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_v и $p_{оп}$, 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_g и оправки α_{on} от 1° до 3° и отношении между коэффициентами трения на контактной поверхности с волокой f_g 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 12X1МФ 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×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.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ:

1. 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 «Металлургия». – 2015. – Т18(4). – С. 122 – 127.

2. 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.

3. Выдрин, А.В. Развитие методов математического моделирования процессов в производстве бесшовных труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков, К.Ю. Яковлева [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, №2. – С. 107 – 115.

Патенты:

1. 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. – 1 с.

2. 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. – 7 с.

Публикации в других изданиях:

1. Чурбанов, В.И. Сравнительный анализ параметров труб, полученных способами монолитного и роликового волочения / В.И. Чурбанов, К.Ю. Панова *, Б.В. Баричко, А.А. Бакунова // VIII Конгресс прокатчиков: сборник трудов, Магнитогорск. – Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2010. – С. 291 – 293.

2. Баричко, Б.В. Анализ силовых параметров процессов оправочного волочения труб / Б.В. Баричко, К.Ю. Яковлева, В.Н. Кузнецов [и др.] // Трубы-

2012: сборник докладов юбилейной XX научно-технической конференции, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности.– Челябинск: РосНИТИ, 2012. – Ч. 2. – С. 53 – 57.

3. Яковлева, К.Ю. Постановка задачи математического моделирования процесса оправочного волочения труб / К.Ю. Яковлева // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции, Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 2. – С. 90 – 93.

4. 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.

5. Яковлева, К.Ю. Актуальные трибологические проблемы при волочении и их решение / К.Ю. Яковлева // Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства: материалы II международной научно-практической конференции, Магнитогорск. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. – С. 29.

6. 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. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». – 2016. – №2(7). – С. 34 – 40.

7. Яковлева, К.Ю. Повышение эффективности процесса волочения труб на ПАО «СинТЗ» / К.Ю. Яковлева, А.В. Выдрин, В.Н. Кузнецов [и др.] // Трубы-2016: сборник докладов XXII научно-практической конференции, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности. – Челябинск: РосНИТИ, 2016. – Ч. 2. – С. 251 – 256.

* Фамилия изменена на Яковлева на основании свидетельства о заключении брака П-ИВ №569004 от 10/09/2011 г.