

На правах рукописи

Вагапов Евгений Николаевич

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОЛИКОВОГО
ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ НА ДЛИННОЙ ОПРАВКЕ С ЦЕЛЬЮ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ**

Специальность 05.02.09 Технология и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2012

Работа выполнена на кафедре «Металлургические и роторные машины»
ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Орлов Григорий Александрович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Чечулин Юрий Борисович,
УрФУ
кандидат технических наук
Смирнов Николай Аркадьевич,
ОАО «Уралгипромез»

Ведущая организация ОАО «Уральский институт металлов»

Защита состоится 16 марта 2012 года в 16⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.285.10 в ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул.
Мира, д. 19, главный учебный корпус, ауд. М-323.

Телефон (343) 378-67-53, E-mail: raskatov@pochta.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «УрФУ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Автореферат размещен на сайте ВАК 08.02.2012 г.

Автореферат разослан 10 февраля 2012 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Е.Ю. Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Развитие таких отраслей промышленности, как транспортное и энергетическое машиностроение, атомная техника, судостроение и др., предъявляет повышенные требования к качеству холоднодеформированных труб, в том числе к их точности. Классическими способами холодной деформации являются волочение через стационарные волокни и холодная валковая и роликовая прокатка. Комбинацией этих способов обеспечивается довольно широкий сортамент холоднодеформированных труб и высокое их качество. Однако классические способы имеют ряд общеизвестных недостатков: при волочении велика вероятность образования рисков, а холодная прокатка отличается высокой энергоемкостью, малой производительностью, сложностью настройки станов и изготовления инструмента, а также ограниченностью сортамента прокатываемых труб. Поэтому актуальной является задача разработки и исследования новых или комбинированных способов холодной деформации труб.

Настоящая работа посвящена исследованию точности труб, получаемых роликовым волочением на длинной оправке. Этот способ имеет ряд преимуществ: малая энергоемкость при использовании неприводных роликов; исключение образования рисков на поверхности из-за уменьшения скольжения по инструменту; более высокая производительность; низкая вероятность адгезии на контактных поверхностях роликов и трубы; простота конструкции по сравнению со станами холодной прокатки.

Диссертационная работа выполнена в рамках федеральной научно-технической целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», по государственному контракту № 02.740.11.0152 «Разработка новой комплексной металлургической технологии производства высококачественных стальных изделий массового назначения».

Цель работы состоит в разработке математической модели роликового волочения труб на длинной оправке и технологических рекомендаций по его применению для получения труб заданного уровня точности.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель процесса волочения труб в неприводных роликах на длинной оправке;
2. С помощью математической модели изучить закономерности изменения разностенности труб в зависимости от технологических параметров;
3. Разработать конструкцию роликовой волоки для волочения труб повышенной точности с минимальным скольжением;
4. Подготовить научно-обоснованные рекомендации по промышленному использованию роликового волочения труб.

Научная новизна исследования:

1. С помощью метода конечных элементов построена математическая модель процесса роликового волочения труб на длинной оправке, в том числе модель формоизменения поперечного сечения трубы и изменения разностенности.
2. В результате математического моделирования изучены закономерности изменения разностенности труб в зависимости от технологических параметров: калибровка инструмента, коэффициент вытяжки, исходная разностенность и тонкостенность трубы, марка материала трубы, ориентация профиля трубы.

Достоверность. Научные результаты и выводы получены на основе теоретических исследований, выполненных с применением фундаментальных положений теории обработки металлов давлением, механики сплошных сред, в частности, метода конечных элементов и пакета прикладных программ DEFORM-3D. Они не противоречат существующей и полученной автором экспериментальной информации. Адекватность полученных регрессионных моделей проверена современными методами математической статистики.

Практическая значимость:

1. Разработаны инженерные методики определения рациональных технологических параметров роликового волочения для получения труб заданного уровня точности.
2. Предложена конструкция роликовой волоки с разрезными роликами, обеспечивающая минимальное скольжение на поверхности контакта с трубой.
3. Разработаны технологические предложения по применению роликового волочения при производстве нержавеющей труб.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на III Региональной научно-технической конференции «Образование и производство – 2009», Верхняя Салда, 2009; VI Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении», Пенза, 2010; XVIII Международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники, Екатеринбург, 2010; IV Международной научной заочной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии», Липецк, 2011.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 статьи в российских периодических изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка использованных литературных источников и приложения. Работа изложена на 162 страницах, включая 24 таблицы, 74 рисунка, и список использованных источников из 167 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены предмет и цель работы, ее актуальность, практическая значимость и научная новизна.

В первой главе выполнен литературный обзор по проблематике диссертации, приведены основные показатели, характеризующие точность труб, и методы, используемые при ее исследовании, в частности, математическая статистика и математическое моделирование. Отмечается, что большой вклад в теорию и практику исследования точности труб внесли В.А.Вердеревский, Г.И.Гуляев, Ю.Г.Гуляев, В.Н.Данченко, П.Т.Емельяненко, Е.Д.Клемперт, Е.Д.Кузнецов, Б.Н.Матвеев, В.В.Носаль, Л.Н.Оклея, Я.Е.Осада, В.Я.Осадчий, М.В.Попов, И.Н.Потапов, Б.А.Романцев, Ф.С.Сейдалиев, В.И.Соколовский, В.П.Сокуренок, М.Ф.Столетний, А.П.Чекмарев, Ю.Б.Чечулин, Ю.Ф.Шевакин и др.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на разностенность готовых труб в различных процессах холодной деформации, приведены преимущества использования роликовых волок по сравнению с монолитными. Обнаружено, что отсутствуют сведения о влиянии технологических факторов на точность труб, производимых роликовым волочением на длинной оправке. Из рассмотренных факторов для проведения исследования были выбраны следующие: исходная разностенность трубной заготовки, коэффициенты вытяжки и интенсивности упрочнения материала трубы, тонкостенность труб, условия трения и коэффициент, характеризующий развалку роликового калибра.

Произведен обзор конструкций роликовых волок. На основе обзора определены основные направления и резервы совершенствования конструкций роликовых волок для повышения точности изготавливаемых труб. В литературе не было обнаружено устройства, которое бы осуществляло выравнивание скоростей течения металла и вращения роликов волокна.

Исходя из материала, изложенного в первой главе, поставлены задачи исследования, приведенные выше.

Во второй главе разработана математическая модель роликового волочения трубы через неприводные ролики на длинной оправке. Были приняты следующие допущения: материал - изотропный, упрочняемый, жестко-пластический, несжимаемый; деформация изотермическая; массовыми и инерционными силами пренебрегали; также не учитывались упругие деформации материала и инструмента. Для описания процесса была использована система дифференциальных уравнений теории пластичности, которая включает уравнения равновесия, условие несжимаемости, соотношения, связывающие скорости деформаций со скоростями точек тела, уравнения связи напряженного и деформированного состояния. Также определены начальные и граничные условия. На поверхности контакта материала и инструмента задаётся условие трения по Зибелю.

Для решения системы уравнений был выбран метод конечных элементов (МКЭ) с использованием вариационного подхода. Задача решения нелинейных уравнений жесткости решалась с помощью итерационного метода Ньютона-Рафсона. Реализация математической модели осуществлена с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D.

При моделировании технологического процесса в пакете DEFORM разностенная труба закованным концом устанавливается на оправку и проталкивается через две неприводные роликовые волокна. Схема процесса приведена на рис. 1.

Каждая роликовая волока состоит из трех одинаковых роликов, которые расположены под углом 120^0 друг к другу и образуют замкнутый калибр, в котором обжимается труба. Калибр состоит из двух частей – идеально-круглой части и выпусков, служащих для предотвращения заклинивания трубы в процессе проталкивания, а также помогающих избежать образования наружных

дефектов на поверхности трубы из-за переполнения калибра. Поперечные сечения трубы до волочения и во время него представлены на рис. 2.

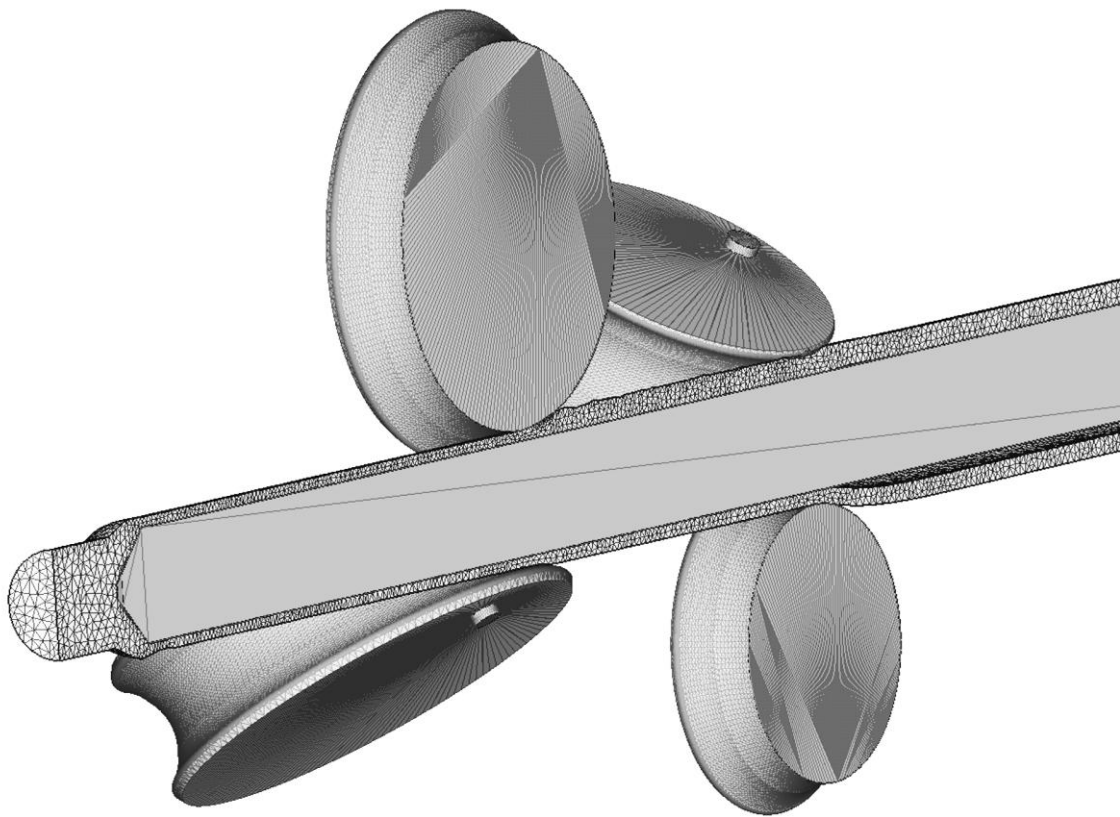


Рис. 1. Схема процесса роликового волочения труб

Отличительной особенностью модели процесса роликового волочения труб на длинной оправке является задание эксцентричной разностенности исходной заготовки с дальнейшим изучением механизмов ее исправления или наведения. Задание исходной разностенности трубы производится по формуле:

$$S = S_{cp} + E \cos \theta, \quad (1)$$

где S_{cp} – номинальная толщина стенки; E – эксцентриситет; $\theta = 0 \dots 2\pi$ – угол диагонального сечения; $\theta = 0$ соответствует максимальной толщине стенки S_{\max} ; $\theta = 2\pi$ соответствует минимальной толщине стенки S_{\min} .

Модель позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние металла, оценивать силу волочения и определять точность труб.

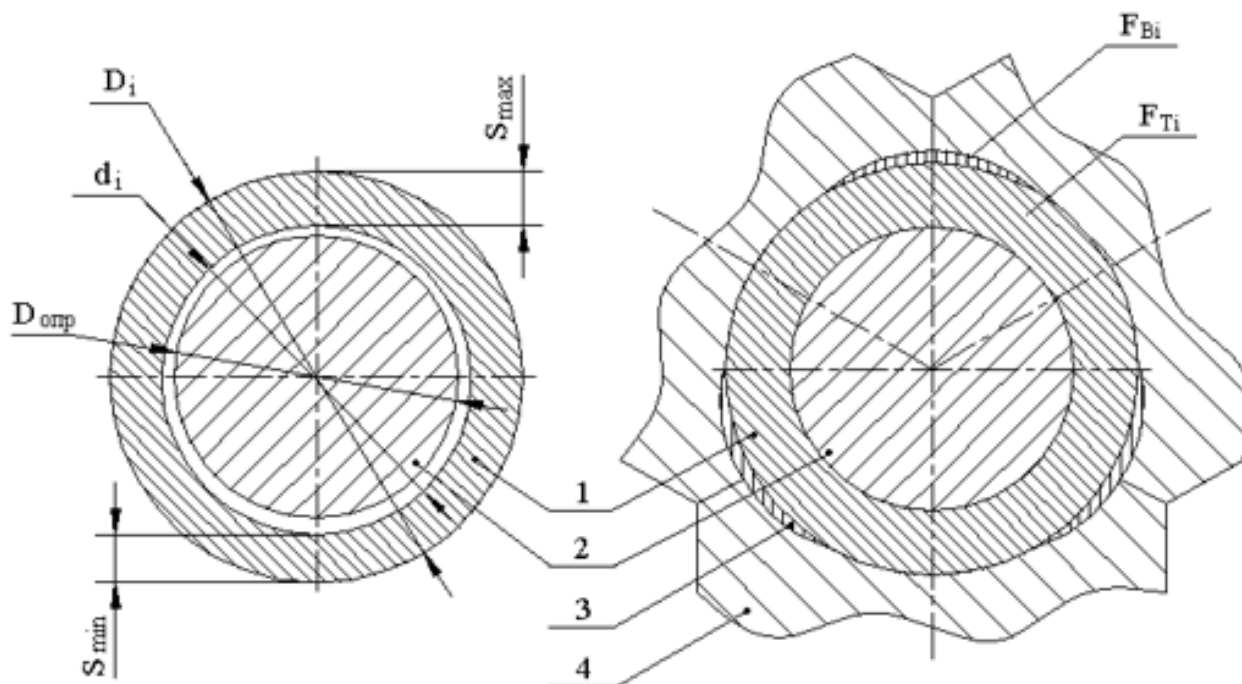


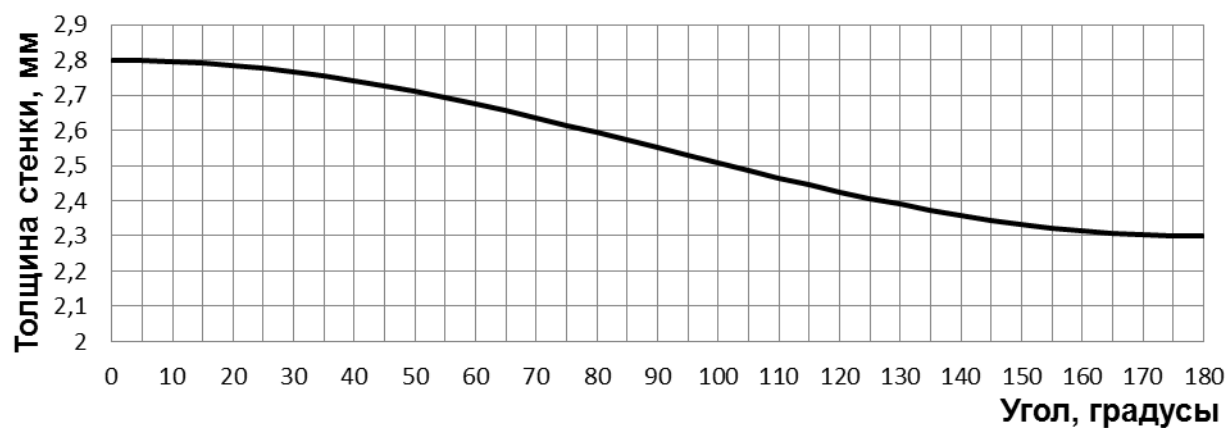
Рис. 2. Поперечные сечения трубы до проталкивания и во время него:

1 – труба; 2 – оправка; 3 – выпуск 4 - ролики.

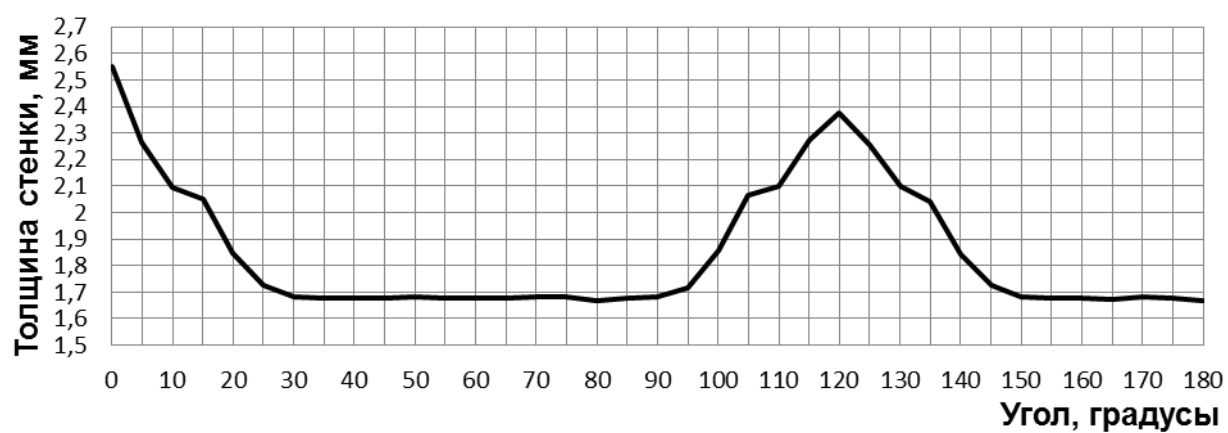
D_i - внешний диаметр трубы в i -м сечении; d_i - внутренний диаметр трубы в i -м сечении; S_i - толщина стенки трубы в i -м сечении; $D_{опр}$ - диаметр оправки; $i = 0, 1, 2$ - индекс сечения трубы; $i = 0$ соответствует трубе до проталкивания; $i = 1, 2$ индексы, соответственно, при прохождении трубой первой и второй волоки; F_{Bi} , F_{Ti} - соответственно, площади выпуска и поперечного сечения трубы в i -ом калибре.

На рис. 3. представлено распределение толщины стенки по периметру трубы на примере волочения толстостенной трубы с размерами 25x2,5мм через 21,4x1,7мм до тонкостенной трубы 20x1мм.

При волочении исходной эксцентричной трубы через первую волоку происходит затекание металла в выпуски, что приводит к увеличению разностенности.



а)



б)



в)

Рис. 3. Распределение толщины стенки по периметру поперечных сечений: а) до деформации, б) после обжатия в первой роликовой волоке, в) после деформации во второй волоке

В то же время при деформации во второй волоке происходит ее значительное снижение, что объясняется раскаткой утолщений, полученных в первой волоке. Во время процесса происходит снижение разностенности с 20% до 14%.

Обнаружено, что во время волочения в первой волоке наблюдается неравномерность распределения напряжений и деформаций по сечению трубы: их рост наблюдается в утолщенной зоне проталкиваемой эксцентричной трубы, а снижение - в утоненной части сечения. При деформировании трубы во второй роликовой волоке происходит более равномерное распределение напряжений и деформаций, с их небольшим ростом на участках соприкосновения роликов и трубы. Вычислительные эксперименты показали, что энергоемкость волочения через роликовые волокна в 1,2 – 1,5 меньше, чем при длиннооправочном волочении через монолитные волокна.

В третьей главе с помощью разработанной во второй главе математической модели проведено исследование зависимости разностенности получаемых труб от технологических факторов, выбранных в первой главе.

Исходная разностенность:

$$\delta_0 = \frac{S_{\max 0} - S_{\min 0}}{S_{\text{ном}0}} 100\% , \quad (2)$$

где $S_{\max 0}$, $S_{\min 0}$, $S_{\text{ном}0}$ - соответственно, максимальная, минимальная и номинальная толщина стенки по сечению трубы до проталкивания.

Коэффициент развалки калибра:

$$K_P = \frac{F_{Bi}}{F_{Ti}} , \quad (3)$$

где F_{Bi} , F_{Ti} – соответственно, площади выпуска и поперечного сечения трубы в i -ом калибре (рис. 2).

Коэффициент вытяжки:

$$\mu = \frac{F_{T0}}{F_{T2}} , \quad (4)$$

где F_{T0} , F_{T2} – соответственно, площади поперечного сечения трубы до и после проталкивания.

Коэффициент интенсивности упрочнения материала:

$$M = \frac{\sigma_T^*}{\sigma_T}, \quad (5)$$

где σ_T , σ_T^* – соответственно, предел текучести материала при степени деформации $\varepsilon = 0$ и при степени деформации $\varepsilon = 2$.

Коэффициент конечной тонкостенности трубы:

$$K_T = \frac{D_2}{S_2}, \quad (6)$$

где D_2 , S_2 – соответственно, внешний диаметр и номинальная толщина стенки после процесса проталкивания.

Значения уровней факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения уровней факторов

Уровень фактора	Коэффициент конечной тонкостенности трубы	Коэффициент вытяжки	Коэффициент развалки калибра	Коэффициент интенсивности упрочнения материала	Коэффициент трения по Зибелю	Исходная разностенность, %
	K_T	μ	K_P	M	ψ	δ_0
1	20	2	0,01	1,4	0,1	10
2	28	3	0,03	1,8	0,2	20
3	36	4	0,05	2,2	0,3	30

На основе проведенных предварительных экспериментов и анализа литературы для проведения исследования был выбран трехуровневый факториальный план Бокса-Бенкена. Всего был проведен 81 опыт, получены соответствующие регрессионные зависимости. Для проверки статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии использовался критерий Стьюдента. Для требуемого уровня значимости $\alpha = 0,05$ наблюдаемое значение

коэффициента сравнивается с критической точкой распределения Стьюдента. Если наблюдаемое значение коэффициента выше критического, то статистическая значимость коэффициента подтверждается. Адекватность модели проверяется с помощью критерия Фишера аналогичным образом.

Регрессионная модель зависимости разностенности от факторов после первой волоки:

$$\delta = -54,90 + 55,75\mu - 6,06\mu^2 - 0,02K_T\mu - 421,54K_p + 1,01\delta_0. \quad (7)$$

Регрессионная модель зависимости разностенности трубы от факторов после второй волоки:

$$\delta = 2,36 + 3,13\mu - 501,07K_p + 13260,44K_p^2 + 5,44K_p\delta_0 - \\ - 2125,90K_p\psi + 23,84\mu\psi + 39,16\psi. \quad (8)$$

В результате статистической оценки влияния факторов значимыми оказались коэффициенты развалки калибра, вытяжки и коэффициент трения, а также исходная разностенность трубы. Коэффициент интенсивности упрочнения материала оказался незначим, а влияние коэффициента тонкостенности на разностенность трубы после прохождения ею первой волоки не превышает 1%.

Выявлены следующие закономерности изменения разностенности во время роликового волочения.

Во время проталкивания эксцентричной трубы на оправке через первую волоку частично или полностью устраняется исходная эксцентричная разностенность за счет утолщения тонких стенок и раскатывания толстых стенок, а также наводится разностенность за счет затекания металла в зоны выпусков, что усиливается с ростом коэффициента вытяжки при коэффициенте развалки калибра меньше 0,04...0,05. Для минимизации разностенности необходимо снижать вытяжку до 2 и увеличивать коэффициент развалки калибра до 0,05.

При волочении трубы через вторую волоку разностенность, наведенная в первой волоке, также может быть уменьшена. Наименьшая разностенность готовой трубы достигается при коэффициенте вытяжки 2 и минимальном трении ($\psi=0,1$), а также при оптимальном значении коэффициента развалки калибра в диапазоне 0,02...0,025. Зависимость разностенности готовой трубы от факторов приведена на рис. 4.

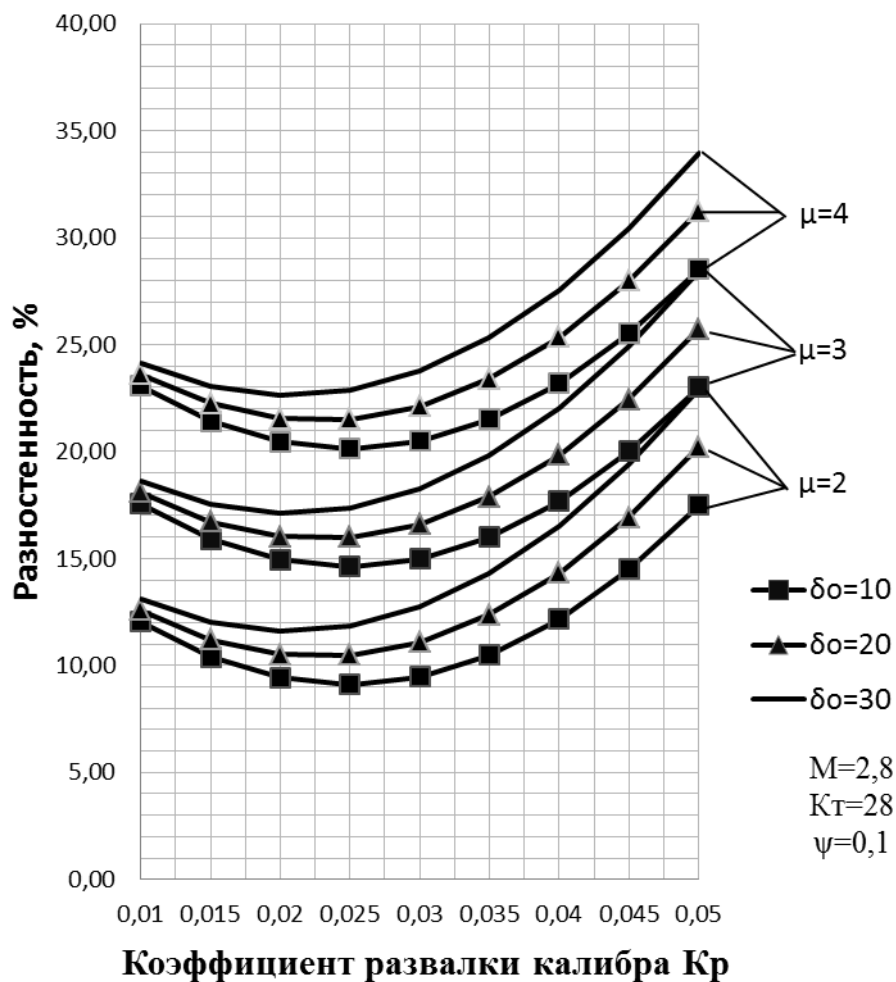


Рис. 4. Зависимость конечной относительной разностенности δ от коэффициента развалки калибра при различных значениях исходной разностенности и вытяжки μ

Оптимальный коэффициент развалки калибра определен из условия получения минимальной разностенности путем дифференцирования уравнения (7) и $\partial\delta/\partial K_p=0$:

$$K_p = \frac{2125,90\psi - 5,44\delta_0 + 501,07}{26520,88}. \quad (9)$$

Диаграмма зависимости коэффициента развалки калибра от исходной разностенности и коэффициента трения ψ представлена на рис. 5.

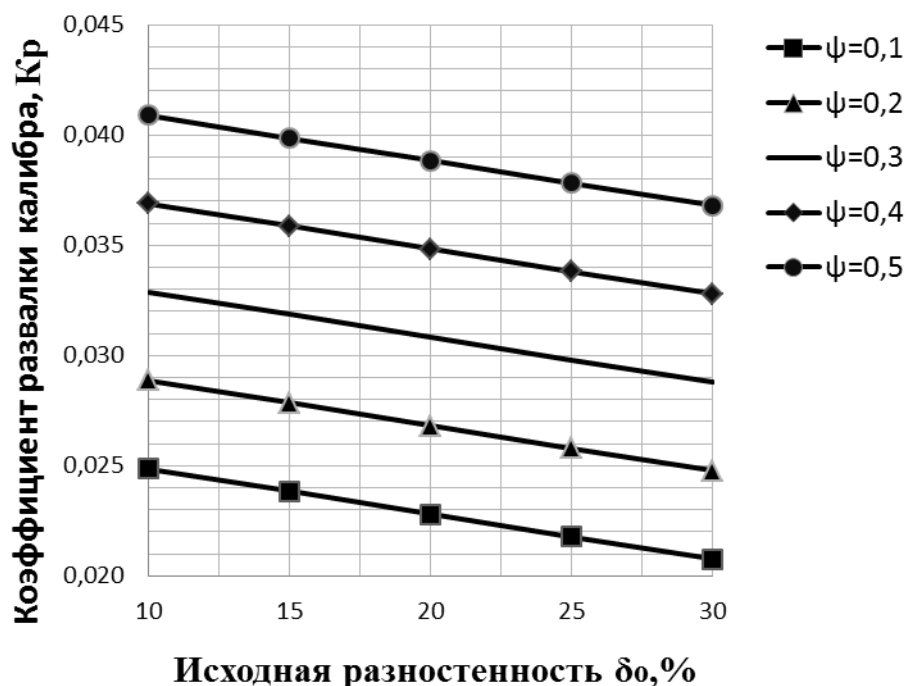


Рис.5. Зависимость коэффициента развалки калибра от исходной разностенности и коэффициента трения

Предложенные условия позволяют осуществлять проведение роликового волочения без возникновения дефектов на поверхности труб.

Проведение роликового волочения с рекомендованными технологическими режимами позволяет получать трубы с разностенностью не выше 9... 12 % при исходной разностенности от 10% до 30%.

В четвертой главе проведена экспериментальная проверка разработанной в главе 3 математической модели зависимости разностенности трубы от технологических факторов, и рекомендации по применению роликового волочения.

Произведено сравнение результатов проталкивания трубы через неприводные ролики в производственных условиях с данными, полученными в результате моделирования (рис. 6). Оценка производилась на основе сравнения средних значений распределения толщины стенки с помощью критерия Стьюдента.

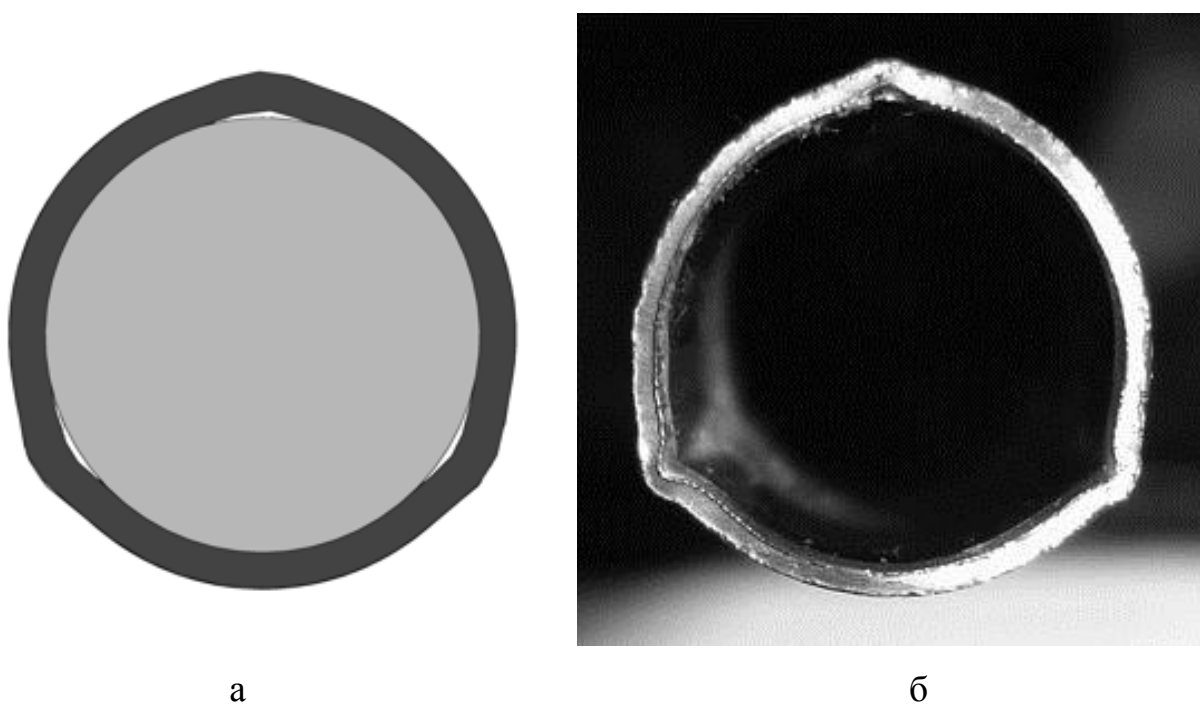


Рис. 6. Сечение трубы 14x1мм: а) расчет в DEFORM-3D; б) эксперимент

Также проведено дополнительное исследование калибровки труб роликовыми волоками. Вычислительные эксперименты показали, что калибровкой можно получать трубы с разностенностью не более 5%, для этого коэффициент вытяжки должен быть не более 1,1, а коэффициент развалки калибра должен изменяться от 0 до 0,01. Поперечное сечение трубы, полученной калибровкой трубы на рис. 6а представлено на рис. 7, распределение толщины стенки по периметру сечения – на рис. 8.

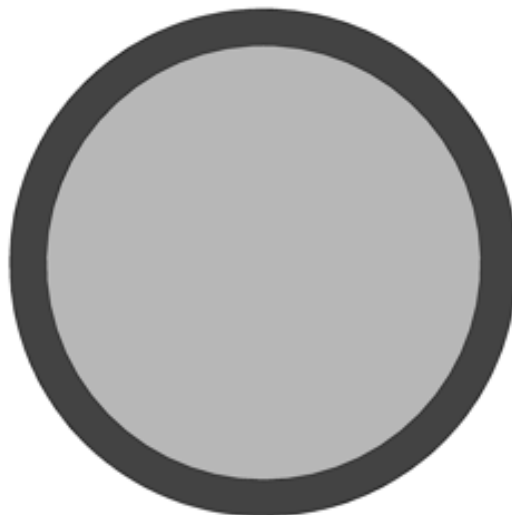


Рис. 7. Сечение трубы 14х1мм калибровки

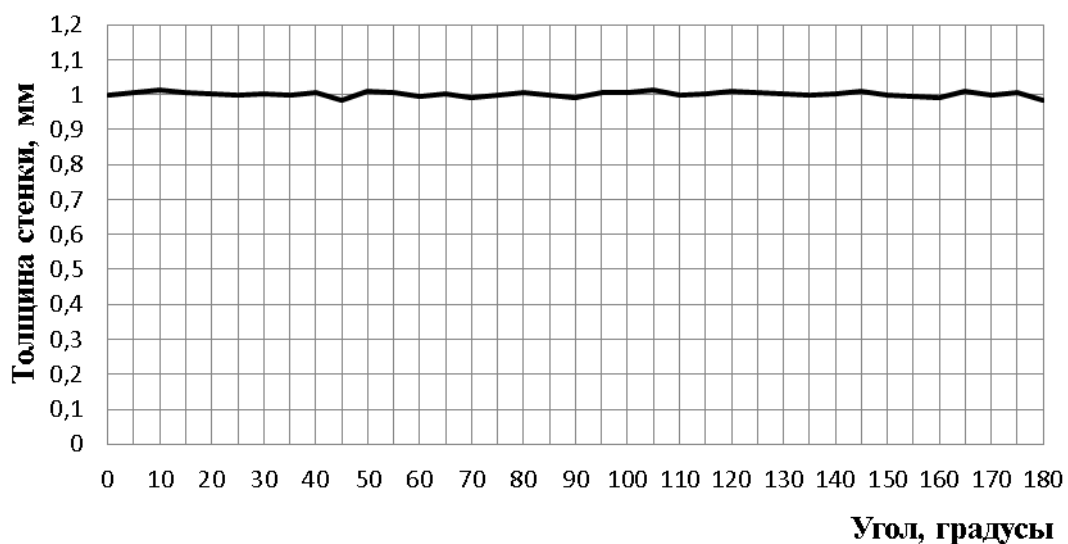


Рис. 8. Распределение толщины стенки по периметру поперечного сечения трубы после калибровки

Для проведения роликового волочения труба может быть закована либо на хвостовик, либо в упор. В первом случае усилие волочения прикладывается к хвостовику оправки, а во втором – к торцу оправки. В главе приведены схемы расположения оборудования для каждого случая.

Также приведены разработанные конструкции роликовых волок, в частности, одна из которых позволяет осуществить выравнивание скорости течения металла и окружной скорости роликов, что приводит к повышению качества изготавливаемых труб. В то же время волока компактна, обладает требуемой жесткостью, позволяет осуществить точное регулирование положения роликов и снижение распорных усилий. Конструкция оформлена заявкой №2010154359 на выдачу патента РФ на изобретение «Роликовая волока для производства круглых труб».

Подготовлены предложения по совершенствованию технологического процесса изготовления авиационных труб из стали марки 08X18H10T согласно ГОСТ 19277 с применением роликового волочения применительно к цеху В-3 ОАО «Синарский трубный завод». Предложения включают в себя маршруты по изготовлению труб и перечень операций по подготовке труб к роликовому волочению и его проведению. Предлагаемые маршруты для изготовления труб 6х1мм и 7х0,8мм представлены в табл. 2 и 3. Технологические предложения прошли экспертизу в технологических службах завода, утверждены и приведены в приложении к диссертации.

Таблица 2

Маршрут производства трубы 6х1 мм с применением роликового волочения

№ прохода	Маршрут	Вид деформации	Коэф. вытяжки μ
00	102х10,00	заготовка	-
0	101х8,00	расточка, обточка	-
1	68х5,60	ХПТ-90	2,13
2	38х3,10	ХПТ-55	3,23
3	20х1,40	ХПТ-55	4,15
4	16х1,20	РВ	1,46
5	10х1,00	РВ	1,97
6	6х1,00	РВ + калибровка	1,79

где РВ – волочение труб через роликовые волокна.

Таблица 3

Маршрут производства трубы 7х0,8 мм с применением роликового волочения

№ прохода	Маршрут	Вид деформации	Коэф. вытяжки μ
00	102х10,00	заготовка	-
0	101х8,00	расточка, обточка	-
1	68х5,60	ХПТ-90	2,13
2	38х3,10	ХПТ-55	3,23
3	20х1,40	ХПТ-55	4,15
4	16х1,20	РВ	1,46
5	10х1,00	РВ	1,97
6	7х0,80	РВ + калибровка	1,82

Рекомендуемый перечень технологических операций по подготовке и проведению роликового волочения труб представлен в табл. 5 –6.

Таблица 5

Перечень операций по подготовке труб к роликовому волочению после прокатки на стане ХПТ

Наименование операции	
1	Порезка на длины
2	Удаление технологической смазки
3	Термическая обработка (отжиг)
4	Травление
5	Правка
6	Осмотр наружной и внутренней поверхности труб (перископом)
7	Ремонт (при необходимости)
8	Забивка конца трубы
9	Роликовое волочение
10	Извлечение оправки

Таблица 6

Перечень операций по обработке труб между операциями роликового волочения

Наименование операции	
1	Обрезка головок, порезка на длины
2	Удаление технологической смазки
3	Термическая обработка (отжиг)
4	Травление
5	Забивка конца трубы
6	Роликовое волочение
7	Извлечение оправки

Для извлечения оправки предлагается использовать принцип термического расширения металла при нагревании, который заключается в том, что материал оправки имеет больший температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), чем материал трубы. После волочения труба с оправкой нагревается до определенной температуры, обеспечивающей, за счет различных ТКЛР, раздачу внутреннего канала, после охлаждения получается зазор.

Существующий ГОСТ 19277-73 предъявляет следующие требования к точности изготовления труб: предельные отклонения для труб обычного качества составляют +15% и -7,5%. Предельные отклонения для труб повышенного качества составляют, соответственно, +10% и -7,5%.

Применение рекомендованных выше коэффициентов развалки калибра и вытяжки, с учётом обеспечения низкого трения, позволяет получать на выходе из второй волоки трубы с разностенностью не более 9...12%, что соответствует полю допуска 4,5...6%, т.е. превышает требования ГОСТ. Конечная операция калибровки труб в роликовых волоках дает трубы с разностенностью в пределах 5%. Таким образом, использование предложенной технологии без калибровки обеспечивает получение труб обычного качества, а применение завершающей, калибровочной волоки позволяет получать трубы повышенного качества.

С помощью модели роликового волочения также была определена поврежденность труб в формулировке А.А.Богатова. В наиболее сложных условиях предложенных маршрутов поврежденность не превышает $\omega=0,15$, что не приводит к образованию энергетически устойчивых микропор и не снижает эксплуатационные свойства полученных труб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана трехмерная конечно-элементная математическая модель роликового волочения труб на длинной оправке и реализована с помощью пакета программ DEFORM-3D. Отличительной особенностью модели является возможность задания эксцентричной разностенности исходной заготовки с дальнейшим изучением механизмов ее исправления или наведения и оценки точности получаемых труб.

2. С помощью математической модели и аппарата метода планирования вычислительного эксперимента выявлены следующие закономерности изменения эксцентричной разностенности труб:

- из исследуемых факторов статистически значимыми оказались коэффициенты развалки калибра, вытяжки и коэффициент трения, а также исходная разностенность трубы; коэффициенты тонкостенности и интенсивности упрочнения материала оказались незначимы;
- при волочении через одну роликовую волоку снижение разностенности происходит при снижении коэффициента вытяжки до 2 и увеличении коэффициента развалки калибра до 0,05; наведение разностенности происходит за счет затекания металла в зоны выпусков с ростом коэффициента вытяжки и коэффициенте развалки калибра, меньшем 0,04...0,05.
- при волочении через две последовательно установленные волоки наименьшая разностенность достигается при коэффициенте вытяжки во второй волоке 2 и минимальном трении ($\psi=0,1$), а также при оптимальном значении коэффициента развалки калибра от 0,02 до 0,025;
- во время волочения в первой волоке наблюдается неравномерность распределения напряжений и деформаций по сечению трубы: их рост наблюдается в утолщенной зоне проталкиваемой эксцентричной трубы, а снижение - в утоненной части сечения;

- при деформировании трубы во второй роликовой волоке происходит более равномерное распределение напряжений и деформаций, с их небольшим ростом на участках соприкосновения роликов и трубы;
- калибровкой в третьей волоке с коэффициентом развалки не более 0,01 можно получать трубы с разностенностью не более 2%, для этого коэффициент вытяжки должен быть не более 1,1;
- закономерности реализованы в виде регрессионных зависимостей, проверена их адекватность по критерию Фишера.

3. Проведение роликового волочения с рекомендованными технологическими режимами позволяет получать трубы с разностенностью не выше 10% при исходной разностенности 30%.

4. Вычислительные эксперименты показали, что энергоемкость волочения через роликовые волокна в 1,2 – 1,5 меньше, чем при длиннооправочном волочении через стационарные волокна.

5. Разработана и оформлена заявкой на изобретение конструкция роликовой волоки, которая обладает повышенной жесткостью, позволяет осуществить точное регулирование положения роликов и снижение распорных усилий, а также позволяет осуществить выравнивание скорости течения металла и окружной скорости роликов, что приводит к повышению качества изготавливаемых труб.

6. Разработаны технологические предложения по совершенствованию маршрутов изготовления авиационных труб с применением роликового волочения из стали марки 08X18H10T по ГОСТ 19277 применительно к цеху В-3 ОАО «Синарский трубный завод». Предложенная схема производства позволяет получать трубы обычного качества с разностенностью 9-12% и трубы повышенного качества изготовления с разностенностью до 2%. Для предложенных маршрутов проведена оценка накопленной поврежденности, которая не превысила 0,25, что не вызывает снижения эксплуатационных свойств труб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Перспективы развития способа прокатки труб на реечном стане / Г.А. Орлов, Е.Н. Вагапов, В.А.Спиридонов, Т.В. Спиридонова // Образование и производство – 2009: Материалы III региональной научно-технической конференции. Верхняя Салда, 2009. С. 149-154.
2. Орлов Г.А., Вагапов Е.Н. Моделирование процесса проталкивания труб через неприводные ролики // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: Сборник статей VI Международной научно-технической конференции. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010. С.94-97.
3. Орлов Г.А., Вагапов Е.Н. Исследование процесса проталкивания труб через неприводные ролики с помощью конечно-элементного метода // Научные труды XVIII Международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники. Ч. 2, 2010. С. 202-204.
4. Орлов Г.А., Вагапов Е.Н., Спиридонов В.А. Исследование точности труб, изготавливаемых проталкиванием через неприводные ролики // Производство проката. 2010, № 9. С. 37-40.
5. Орлов Г.А., Вагапов Е.Н. Обзор конструкций роликовых обойм // Бюллетень Черная металлургия. 2010, № 9. С. 52-63.
6. Орлов Г.А., Вагапов Е.Н. Моделирование изменения разностенности труб при проталкивании через неприводные ролики // Производство проката. 2011, № 3. С. 15-19.
7. Орлов Г.А., Вагапов Е.Н. Исследование изменения разностенности труб при проталкивании через неприводные ролики // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов IV Международной научной заочной конференции. – Липецк, 2011. С. 114-119.

