

Пастушенко Татьяна Сергеевна

**ВОЛОЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ
ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ**

Специальность 05.03.05–Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Каргин Владимир Родионович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Костышев Вячеслав Александрович

кандидат технических наук, доцент
Чертков Геннадий Вячеславович

Ведущая организация: ОАО «Самарский металлургический завод», г. Самара

Защита состоится 29 апреля 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.03, созданном при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».

Автореферат разослан 26 марта 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Клочков Ю.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Уровень трубного производства в значительной степени определяет развитие большинства отраслей народного хозяйства. Быстро развивающиеся электроэнергетика, судостроение, авиастроение, атомная, космическая и холодильная техника требуют соответствующего развития производства труб.

Особенно важным является производство холоднотянутых тонкостенных труб. Эти трубы применяются во многих областях народного хозяйства России в качестве трубопроводов и должны удовлетворять высоким требованиям по точности геометрических размеров и качеству изготовления.

Производство холоднотянутых труб осуществляется в трубоволоочильных цехах металлургических заводов способами холодной прокатки и волочения. В этих условиях в последнее время внедряются новые технологические процессы, совершенствуются существующие, применяется новое волочильное оборудование, инструмент и новые методы волочения. При производстве гладких тонкостенных труб в отечественной и зарубежной практике широкое применение нашло безоправочное волочение, при производстве тонкостенных труб с внутренним спиральным рифлением – волочение на оправках.

Одним из перспективных, но еще недостаточно изученных является волочение в сочетании с кручением, что позволяет расширить сортамент получаемых труб. В этом процессе кручение реализуется через вращение инструмента (волоки, оправки).

Промышленное использование процесса волочения тонкостенных труб вращаемым инструментом требует дополнительных тщательных исследований по установлению напряженно-деформированного состояния при вращении контактных поверхностей инструмент-заготовка.

Цель работы - исследование напряженно-деформированного состояния в процессе волочения тонкостенных труб вращающимся инструментом и разработка на этой основе научно-обоснованных методов расчета технологических параметров для его практической реализации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель безоправочного волочения тонкостенных труб во вращающихся волоках с учетом реальных свойств материала заготовки.
2. Выполнить на ЭВМ моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе волочения и выявить особенности и закономерности формоизменения тонкостенных труб во вращающихся волоках.
3. Провести экспериментальные и численные исследования с применением САЕ-систем процесса безоправочного волочения тонкостенных труб во вращающихся волоках и проверить адекватность расчета технологических параметров по математической модели.
4. Разработать методику расчета технологических параметров при одновременном волочении и скручивании тонкостенной трубы вращающимся инструментом.
5. Разработать способ волочения тонкостенных труб с внутренним спиральным рифлением на короткой свободно-вращающейся оправке.
6. Создать методику расчета технологических параметров предлагаемого способа изготовления тонкостенных труб с внутренним спиральным рифлением, основанного на операциях волочения и раздачи труб на короткой свободно-вращающейся оправке, обеспечивающего получение рифления требуемой высоты.

Достоверность научных результатов подтверждается корректностью применения математического аппарата и принятых допущений; строгой математической постановкой задач; соответствием результатов численных исследований и экспериментальных данных.

Методы исследования. Теоретические исследования процесса безправочного волочения труб во вращаемые волокна выполнены с использованием основных положений теории пластического деформирования анизотропных материалов и конечно-элементного моделирования в программных комплексах ANSYS/LS-DYNA и DEFORM-3D. Анализ напряженного состояния волочения труб с внутренним спиральным рифлением проведен методом совместного решения уравнений равновесия и пластичности.

Экспериментальные исследования выполнены в лабораторных условиях с применением методов математической статистики и математического планирования эксперимента на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30.

Автор защищает математическую модель безправочного волочения тонкостенных труб во вращаемые волокна с учетом нелинейного упрочнения и анизотропии свойств материала трубной заготовки; результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния при безправочном волочении во вращаемые волокна; методики расчета технологических параметров при изготовлении тонкостенных труб с винтовой текстурой и внутренним спиральным рифлением.

Научная новизна состоит в установлении особенностей и закономерностей формоизменения тонкостенных труб в волоке и на выходе из нее при безправочном волочении во вращаемые волокна; получении математических зависимостей для определения давления, обеспечивающего получение оребрения требуемой высоты и силовых условий при раздаче труб на короткой свободно-вращающейся оправке.

Практическая ценность работы. Разработаны методики расчета технологических параметров в процессах волочения тонкостенных труб с винтовой текстурой во вращаемые волокна и внутренним спиральным рифлением; способ изготовления труб с внутренним спиральным рифлением, основанный на операциях волочения и раздачи на короткой свободно-вращающейся оправке, позволяющий изготавливать такие трубы на волочильных станах линейного типа.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: IV Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2008г.) Решетневские чтения (Красноярск, 2007г.), Актуальные проблемы авиации и космонавтики (Красноярск, 2008г.), Туполевские чтения (Казань, 2006г., 2008 г.), Королевские чтения (Самара, 2007г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, четыре статьи.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 128 наименований, содержит 142 страницы машинописного текста, 71 рисунок, 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показана полезная роль кручения в процессах волочения труб, позволяющая выравнивать механические свойства материала труб в продольном и поперечном направлениях, интенсифицировать сдвиговые деформации при протягивании, получать холоднотянутые трубы со спиральными элементами, уменьшать усилие волочения.

Теоретическую основу разработанных решений составили основные положения теорий волочения и кручения, большой вклад в развитие которых внесли отечественные ученые и специалисты: Аркулис Г.Э., Буркин С.П., Ганаго О.А., Гуляев Г.И., Дорохов Л.М., Зазимко В.А., Каргин В.Р., Колмогоров В.Л., Морозенко И.В., Никулин Э.В., Перлин И.Л., Савин Т.А., Тарнавский А.Л., Шевченко А.А., Шлосберг Ю.А. и др., а также зарубежные ученые: Дровман М., Г.Закс, Садок Л. и др.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что целый ряд вопросов по широкому использованию кручения в процессах волочения в сфере производства труб не получил должного развития. Создавшееся положение объясняется тем, что рассматриваемый вопрос мало изучен. До сих пор отсутствует анализ напряженно-деформированного состояния при волочении тонкостенных труб вращающимся инструментом. Число патентов на способы и устройства для волочения труб вращающимся инструментом значительно превышает число теоретических работ, что затрудняет их использование на производстве.

По результатам анализа первой главы сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке и реализации на компьютере математической модели безоправочного волочения тонкостенных труб во вращаемые волокна при следующих допущениях:

- деформация тонкостенной трубы осесимметричная и безмоментная;
- напряженное состояние плоское, а меридиональное σ_l и окружное σ_φ напряжения – главные напряжения;
- трубная заготовка трансверсально-изотропная, главная ось анизотропии 1 совпадает с осью волочения, а главные оси анизотропии 2 и 3 расположены в плоскости поперечного сечения трубы;
- упрочнение материала изотропное и определяется в виде степенной функции;
- на поверхности контакта трубной заготовки с волоком действуют силы трения, определяемые по закону Кулона;

Напряженно-деформированное состояние тонкостенной трубы описывается следующей системой уравнений:

$$de_l = \frac{dl}{l}; \quad de_\varphi = \frac{dR}{R}; \quad de_r = \frac{dt}{t}; \quad (1)$$

$$de_l + de_\varphi + de_r = 0; \quad (2)$$

$$d\bar{e}_{il} = \frac{1}{\sqrt{1-\mu_r^2}} \sqrt{de_\varphi^2 + de_r^2 + 2\mu_r de_\varphi de_r}; \quad (3)$$

$$\sigma_{il} = \sigma_{TO} + A(\varepsilon)^n, \quad \varepsilon = \frac{F_o - F}{F_o} \quad (4)$$

$$\sigma_l = \frac{\mu_r}{1 - \mu_r^2} \frac{\sigma_{il}}{de_{il}} \left[\left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right) de_\varphi + \frac{de_r}{\mu_r} \right]; \quad (5)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{\mu_r}{1 - \mu_r^2} \frac{\sigma_{il}}{de_{il}} \left[\left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right) de_\varphi - de_r \right] \quad (6)$$

$$p = \frac{\sigma_\varphi t \cos \alpha}{R} + \frac{\sigma_l t}{R_p}; \quad (7)$$

$$\frac{d}{dR} (\sigma_l R t) + \sigma_\varphi t + \frac{fPR \cos \arctg \left(\frac{\omega R F}{V_B F_K} \right)}{\sin \alpha} = 0; \quad (8)$$

$$M_{TP} = 2\pi R^2 l f P \sin \beta, \quad (9)$$

где l, R, t - соответственно текущие значения длины, радиуса и толщины элемента заготовки; de_l, de_φ, de_r -бесконечно малые приращения главных деформаций; $\overline{de_{il}}$ и σ_{il} - интенсивности бесконечно-малых приращений деформаций и напряжений в направлении оси волочения; A, n – коэффициенты аппроксимации кривой упрочнения; ε - степень деформации; μ_r - коэффициент анизотропии; α - угол конусности волокна; R_p - радиус кривизны радиусного участка; p – контактное давление; f - коэффициент трения; ω - угловая скорость вращения волокна, V_B - скорость волочения, β - угол, характеризующий положение вектора скорости V_{PA} , (рис.1), M_{TP} - крутящий момент от сил трения.

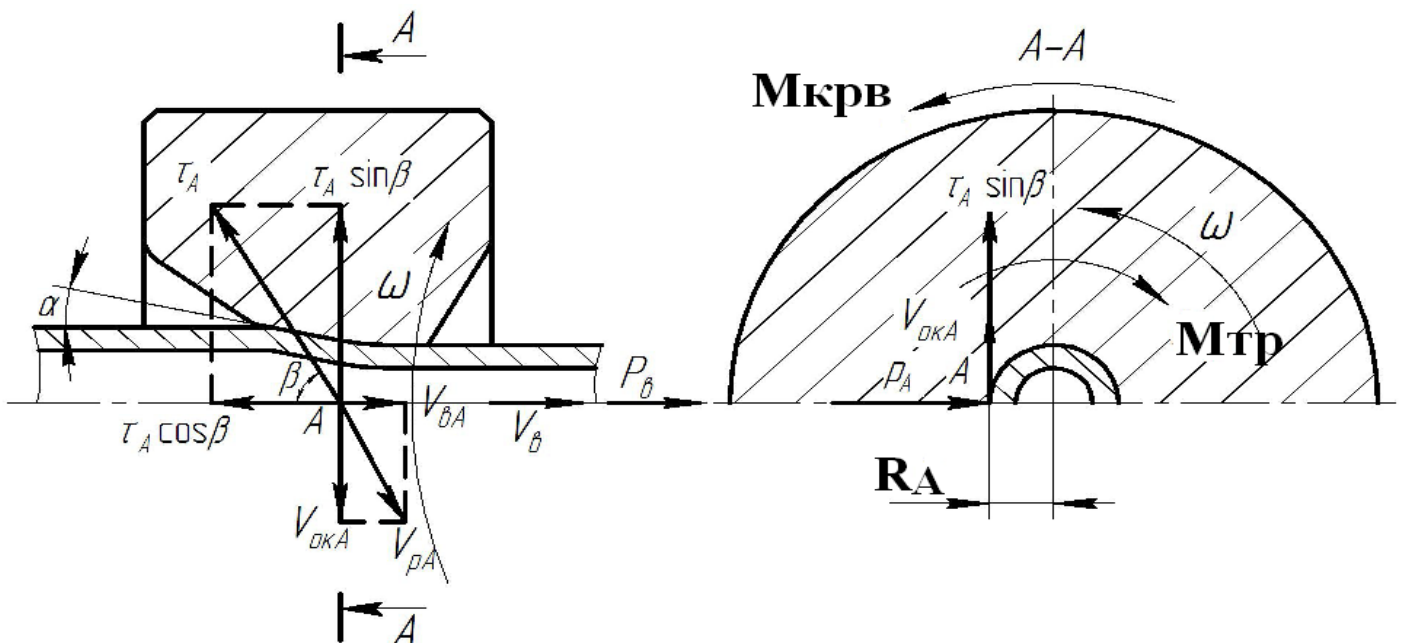


Рисунок 1 – Напряжения трения и скорости движения во вращающейся волоке на границе контакта поверхностей инструмент-заготовка

На калибрующем участке волокни принимают, что контактные напряжения изменяются по его длине по линейному закону. Уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{d\sigma_l}{dl} = \frac{f}{t} p \cos \arctg \frac{\omega R}{V_B} \quad (10)$$

Параметры напряженно-деформированного состояния находили в конечном числе точек, разбивая трубную заготовку на узкие кольцевые элементы, рис.2. Вычисления начинали с краевого элемента, где напряжения и деформации считали известными и равными $\sigma_l = \sigma_{lyn}$, $\sigma_\varphi = p = 0$, $e_l = e_\varphi = 0$, где σ_{lyn} - напряжение на границе упругой и пластической зон при входе в очаг деформации.

Напряженно-деформированное состояние в других кольцевых элементах определяли от элемента к элементу при решении системы приведенных уравнений (1)...(10), записанных в конечно-разностном виде.

На выходе из канала волокни рассчитывали усилие волочения P_B и крутящий момент M_{TP}

$$P_B = (\sigma_l)_K \pi (2R_K - t_K) t_K, \quad M_{TP} = \sum_{i=1}^n M_{TPi}$$

Результирующее напряжение волочения на протянутом участке готовой трубы находили по энергетической теории прочности

$$\sigma_{VOL}^\Sigma = \sqrt{(\sigma_l)_K^2 + 3\tau_{KP}^2}, \quad \tau_{KP} = \frac{M_{TP}}{2\pi R_{cp}^2 t_K}$$

Математическая модель реализована в среде программирования Delphi 7.0.

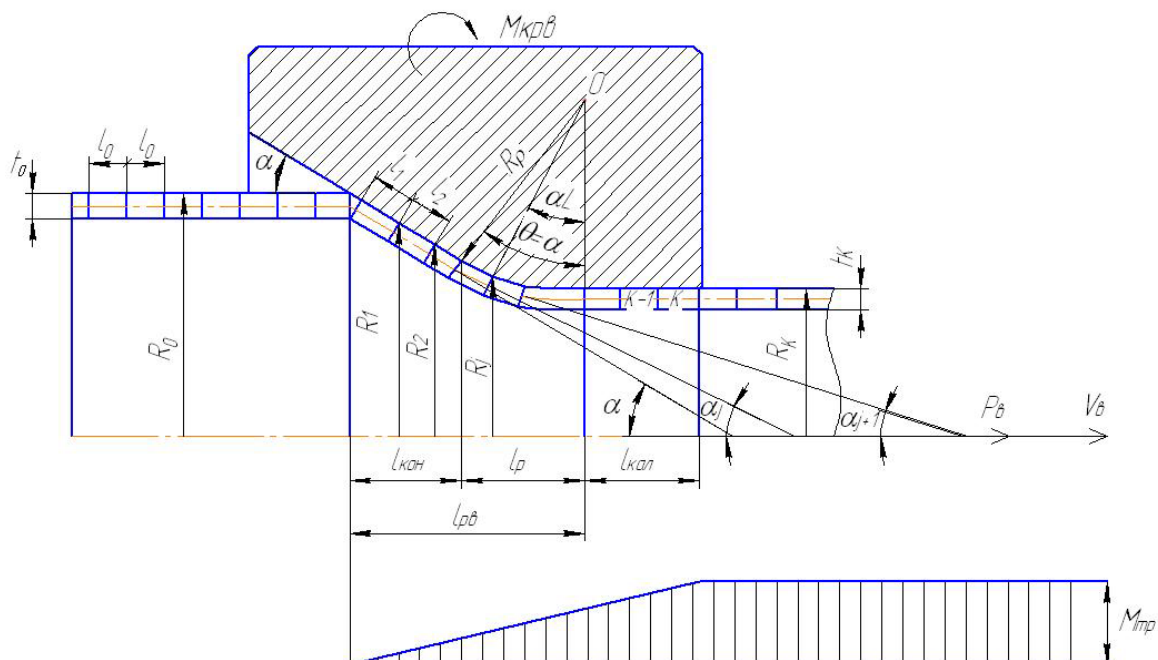


Рисунок 2 – Схема безоправочного волочения тонкостенной трубы во вращаемую волоку

Из анализа графиков, полученных с помощью математической модели следует, что по мере продвижения металла трубы вдоль волочильного канала длиной $l_{рв}$,

меридиональное напряжение σ_1 возрастает, достигая своего максимального значения на выходе из канала волоки, рис.3. Меридиональное напряжение больше при волочении тонкостенной трубы через неподвижную волоку, чем во вращающуюся волоку. Чем больше скорость вращения волоки, тем больше разница в величине σ_1 . Окружное сжимающее напряжение σ_ϕ и контактное давление P на границе заготовка – инструмент распределены по длине канала по нелинейному закону, возрастая по абсолютной величине к выходу из канала волоки. Вращение волоки вокруг оси протягивания вызывает увеличение P и уменьшение σ_ϕ и не влияет на величину деформации в окружном направлении. С ростом числа оборотов волоки стенка трубы незначительно утолщается. Работа пластического формоизменения тонкостенной трубы не зависит от угловой скорости вращения волоки. Заметное снижение усилия волочения до 40% при волочении во вращаемые волоки имеет место для труб большого диаметра, протягиваемых с небольшими скоростями волочения.

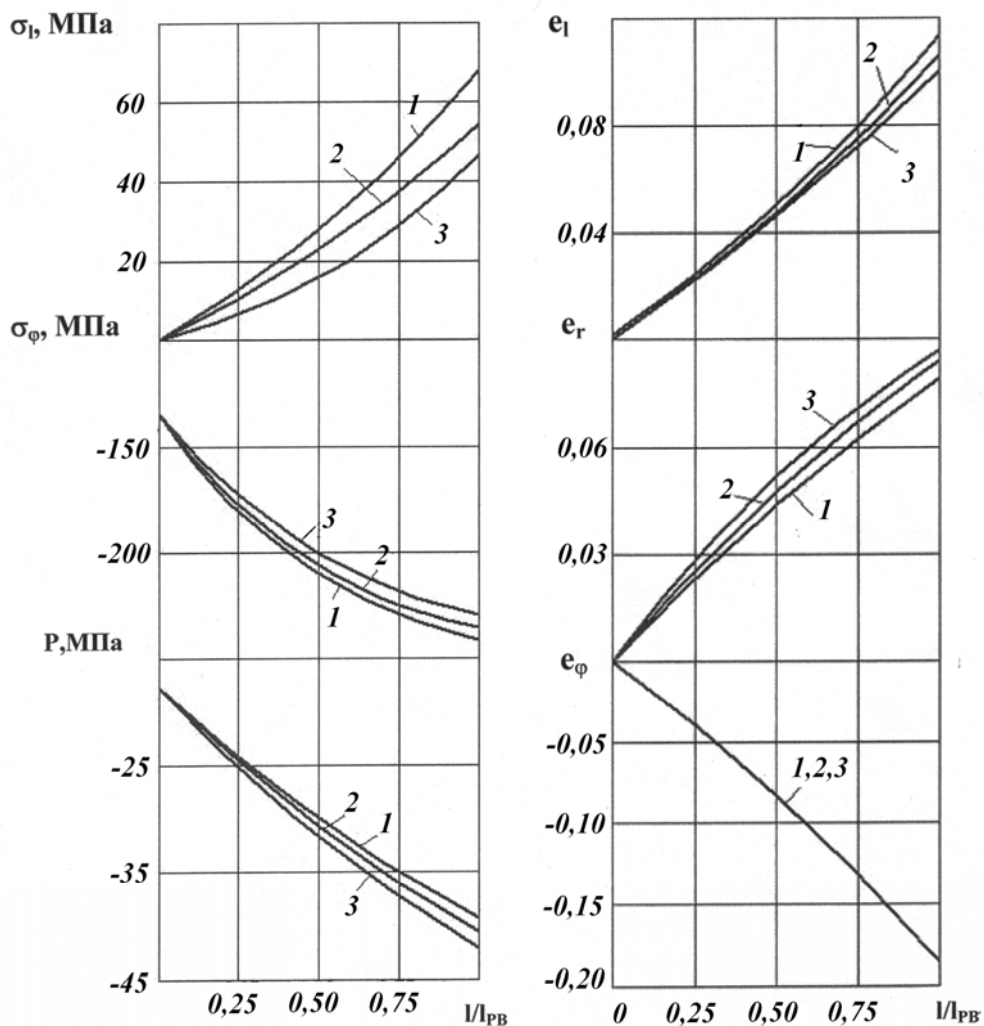


Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние по длине канала вращающейся волоки 1- неподвижная волока; 2 – $n = 570$ об/ мин; 3- $n = 1750$ об/мин

Вращение волоки в плоскости перпендикулярной оси волочения приводит к снижению потребного усилия σ_{VOL} , рис.4. Вместе с тем на протянутом участке появляются касательные напряжения τ_{KR} . Чем быстрее вращается волока, тем больше их величина. Результирующее напряжение волочения σ_{VOL}^{Σ} , не зависит от скорости вращения волоки.

Для интенсификации процесса протянутой участок следует вращать в сторону, противоположную вращению волоки.

В третьей главе проведен анализ напряженного состояния тонкостенной трубы на выходе из канала волокна.

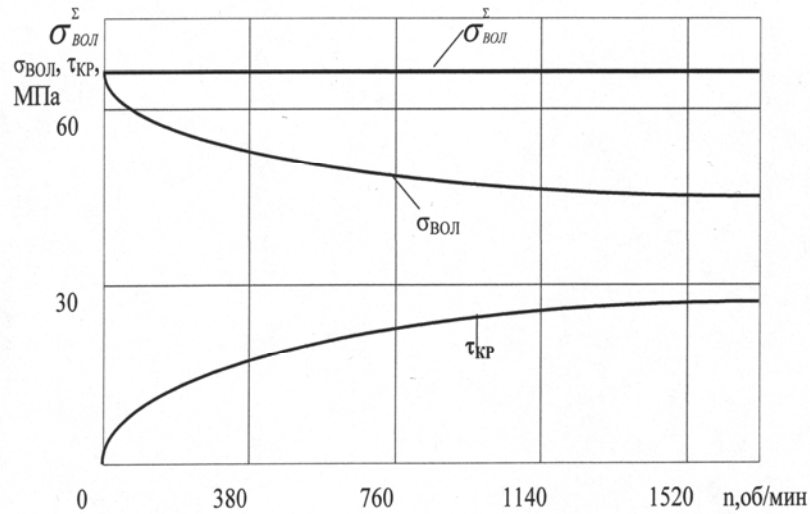


Рисунок 4 – Зависимости напряжений на выходе из канала вращаемой волокна от числа оборотов n

Компоненты напряжений определены из физических уравнений деформационной теории пластичности трансверсально-изотропных сред,

$$\sigma_z = \frac{\sigma_{i1}}{e_{i1}} e_z, \quad \tau_{\varphi z} = \frac{1 - \mu_r}{1 + \mu_r} \frac{\sigma_{i1}}{e_{i1}} \gamma_{\varphi z},$$

связанных между собой энергетическим условием пластичности

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{T1}} \right)^2 + \frac{1 + \mu_r}{1 - \mu_r} \left(\frac{\tau_{\varphi z}}{\sigma_{T1}} \right)^2 = \left(\frac{K_1 e_{i1}^n}{\sigma_{T1}} \right)^2.$$

Осевые напряжения по торцам скручиваемой трубы уменьшают величину касательных напряжений $\tau_{\varphi z}$, рис.5. Чем больше напряжение волочения, тем меньший момент необходимо приложить к трубе. Коэффициент анизотропии и упрочнение материала оказывают существенное влияние на распределение компонент напряжений. При $\mu_r=0,5$ выражения переходят в соотношения для изотропного материала, полученные А.Р. Ржаницыным. Уменьшение коэффициента анизотропии требует увеличение сдвиговых напряжений, увеличение – наоборот. При $\mu_r > 0,5$ анизотропия при скручивании трубы играет полезную роль.

Устойчивость поперечного сечения трубы при скручивании определяли по формуле С.П. Тимошенко

$$M_{кр} [M] = \frac{\sqrt{2\pi} E_{1-2}}{3 \sqrt[4]{(1-\mu^2)}} \sqrt{R_{\varphi} t^5}$$

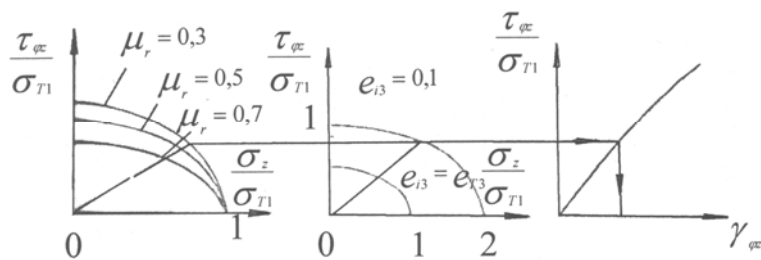


Рисунок 5 - Предельные значения безразмерных напряжений $\frac{\sigma_z}{\sigma_{T1}}$, $\frac{\tau_{\varphi z}}{\sigma_{T1}}$ и угла

упругой раскрутки $\gamma_{\varphi z}$ в зависимости от анизотропии и упрочнения материала

Энергосиловые параметры находили по формулам:

$$P_B = \frac{2\pi K_1 e_{il}^n R_{cp} t}{\sqrt{1 + \left(\frac{\theta}{e_z}\right)^2 R_{cp}^2 \frac{1-\mu_r}{1+\mu_r}}}, \quad M_{KP} = \frac{2\pi K_1 e_{il}^n \frac{1-\mu_r}{1+\mu_r} \frac{\theta}{e_z} R_{cp}^2 t}{\sqrt{1 + \left(\frac{\theta}{e_z}\right)^2 R_{cp}^2 \frac{1-\mu_r}{1+\mu_r}}},$$

где θ - относительный угол закрутки.

Величину угла упругого раскручивания определяли по формуле

$$\gamma_{\varphi z} = \frac{M_{KP}}{2\pi R_{cp}^2 t G_{1-2}},$$

где G_{1-2} – модуль сдвига в плоскости поперечного сечения трубы.

При изготовлении тонкостенных труб с винтовым расположением волокон, спиральными элементами внутри трубы целесообразно использовать безоправочное волочение со скручиванием через две дистанционно расположенные волокна. В первой по ходу волочения волоке заготовка профилируется в эллипс, а во второй неподвижной волоке при осадке скручивается, восстанавливается ее первоначальная форма в виде кольца, но меньшего диаметра. Крутящий момент передается заготовке через вращаемую профильную волоку. Труба скручивается при определенных условиях. Если момент сопротивления кручению $W_{KP}^{KP.TP}$ протянутой трубы больше момента сопротивления кручению поперечного сечения в эллиптической волоке $W_{KP}^{ЭЛЛ.ТП}$, то скручивание трубы не происходит. Труба проворачивается в эллиптической волоке. Для обеспечения пластического скручивания трубы необходимо, чтобы $W_{KP}^{ЭЛЛ.ТП} > W_{KP}^{KP.TP}$,

$$\text{т.е. } \frac{\pi}{16} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^3 b_0^3 \left[1 - \left(\frac{b_1}{b_0}\right)^3\right] > 0,2D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right], \quad (11)$$

где h_1 и h_0 , b_1 и b_0 - соответственно внутренние и внешние размеры малой и большой оси эллиптического сечения трубы; D и d – наружный и внутренний диаметры готовой трубы. При решении неравенства (11) находят размеры второй волоки с круглым отверстием, исключающие поворот заготовки в первой волоке.

В четвертой главе описаны результаты определения анизотропии механических свойств трубных заготовок и компьютерного моделирования в программных комплексах ANSYS/LS-DYNA и DEFORM-3D.

На установившейся стадии безоправочного волочения трубы $\varnothing 10$ мм из заготовки $\varnothing 13 \times 1$ мм из сплава Д16 через неподвижную и вращаемую ($n=1500$ об/мин) волокна получено распределение компонент напряжений и деформаций в продольном сечении очага пластической деформации, рис.6.

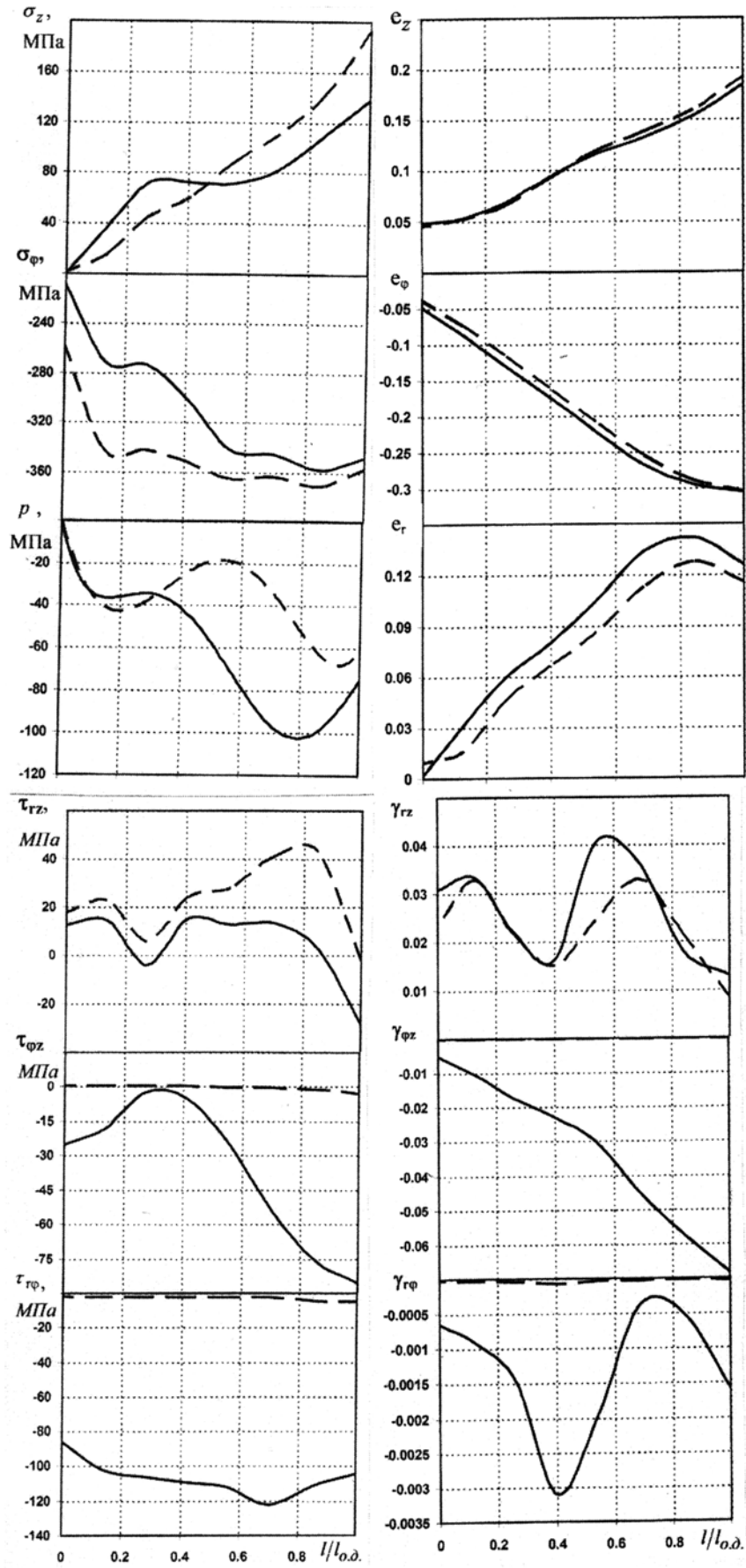


Рисунок 6 – Распределение напряжений и деформаций в очаге пластической деформации — - вращаемая волока; - - - неподвижная волока

Из анализа графиков следует, что вращение волоки приводит к снижению осевых напряжений на 28%. Контактное давление, наоборот, возрастает и имеет два экстремума на входе и выходе из очага пластической деформации, причем пик давления на выходе в 2,8 раза больше, чем на входе. Окружные напряжения по абсолютной величине при вращении волоки уменьшаются. Вращение волоки приводит к увеличению радиальных деформаций на 20%.

В процессе волочения вращение волоки приводит к интенсификации сдвиговых напряжений и деформаций, что может оказать существенное влияние на формирование структуры и свойств готовых труб. В поперечных сечениях очага пластической деформации по мере продвижения металла вдоль канала вращаемой волоки касательные напряжения $\tau_{\varphi z}$ приводят к осевому закручиванию трубы. Их величина нарастает от входа в очаг пластической деформации, достигая своего максимального значения на выходе из очага пластической деформации. Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами расчета по математической модели показало, что программные комплексы ANSYS/LS-DYNA и DEFORM-3D качественно производят процесс безправочного волочения труб через вращаемые волоки.

На рис.7 приведены результаты расчета напряжения волочения и утолщения стенки при волочении труб $\varnothing 30 \times 1,55$ из сплава Д16М через неподвижные и вращаемые волоки ($V_B=8,4$ мм/мин, $n = 1,4$ об/мин), полученные по математической модели и экспериментально в лабораторных условиях на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30.

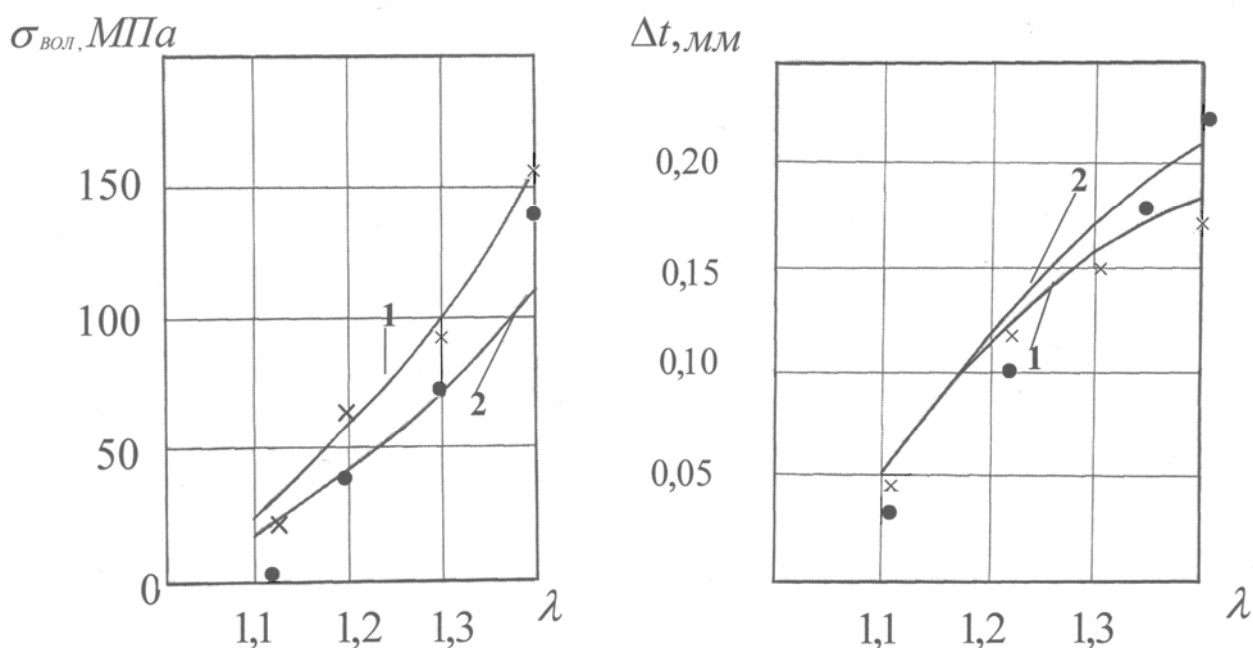


Рисунок 7 – Изменение напряжения волочения $\sigma_{вол}$ и утолщения стенки тонкостенной трубы Δt в зависимости от коэффициента вытяжки: 1 – неподвижная волока, 2 – вращаемая волока, x, • - эксперимент

Из рис.7 видно, что экспериментальные и расчетные результаты отличаются друг от друга в зависимости от величины вытяжки по усилию волочения не более 14%, по утолщению стенки трубы не более 20%. При вращении волоки напряжение волочения

уменьшается по сравнению с волочением в неподвижную волоку и тем больше, чем больше коэффициент вытяжки.

Волочение труб через вращаемые волокна приводит к утолщению стенки. Чем больше степень деформации, тем больше Δt .

В пятой главе описаны результаты экспериментальных исследований волочения труб $\varnothing 18 \times 1,0$ из меди МЗ на короткой вращающейся оправке $\varnothing 15$ мм, на рабочей поверхности которой изготовлена 42-х заходная винтовая нарезка с углами подъема $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ и 30° . Изучено влияние угла подъема спиральных выступов на оправке, положения профилирующей оправки в канале волокна, вытяжки на усилие волочения и высоту получаемого рифления. Установлено, что высота оребрения возрастает с увеличением вытяжки, вместе с тем растет и усилие волочения. Чем больше угол подъема спирали выступов на оправке и чем больше оправка соприкасается с трубой, тем выше усилие волочения. Вследствие этого при изготовлении труб с заданным рифлением процесс волочения на короткой вращаемой оправке становится неустойчивым из-за обрыва захваток.

Предложен способ изготовления труб с внутренним спиральным рифлением в два прохода волочения, что обеспечивает безобрывность процесса за счет снижения усилия протягивания до 50%. Первый проход – это обжатие трубной заготовки до внедрения спиральных выступов оправки на заданную глубину в стенку трубы. Второй проход – это формирование спиральной поверхности внутри трубы требуемой геометрии путем раздачи на свободно- вращаемой оправке, рис. 8.

Из решения дифференциального уравнения равновесия совместно с условием пластичности, получена формула для расчета давления P , необходимого для заполнения спиральных канавок треугольной формы металлом трубы

$$P = \sigma_{T1} \left(1 + \frac{tg\alpha}{f} \right) \left[1 - \left(\frac{h}{S_0} tg\alpha \right) \right], \quad (12)$$

где h - высота ребер, α - угол при вершине канавки, S_0 - основание канавки; σ_{T1} - предел текучести в направлении оси волочения.

При раздаче определена величина контактного давления на оправке

$$P = \frac{2\sigma_{T3} \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}} t_H}{D_{CK} (1 - K f tg\alpha)}, \quad (13)$$

где K – коэффициент, учитывающий увеличение поверхности трения.

Приравняв контактное давление на оправке (13) давлению для формирования спирального рифления (12), нетрудно найти коэффициент раздачи, обеспечивающий получения оребрения требуемой высоты.

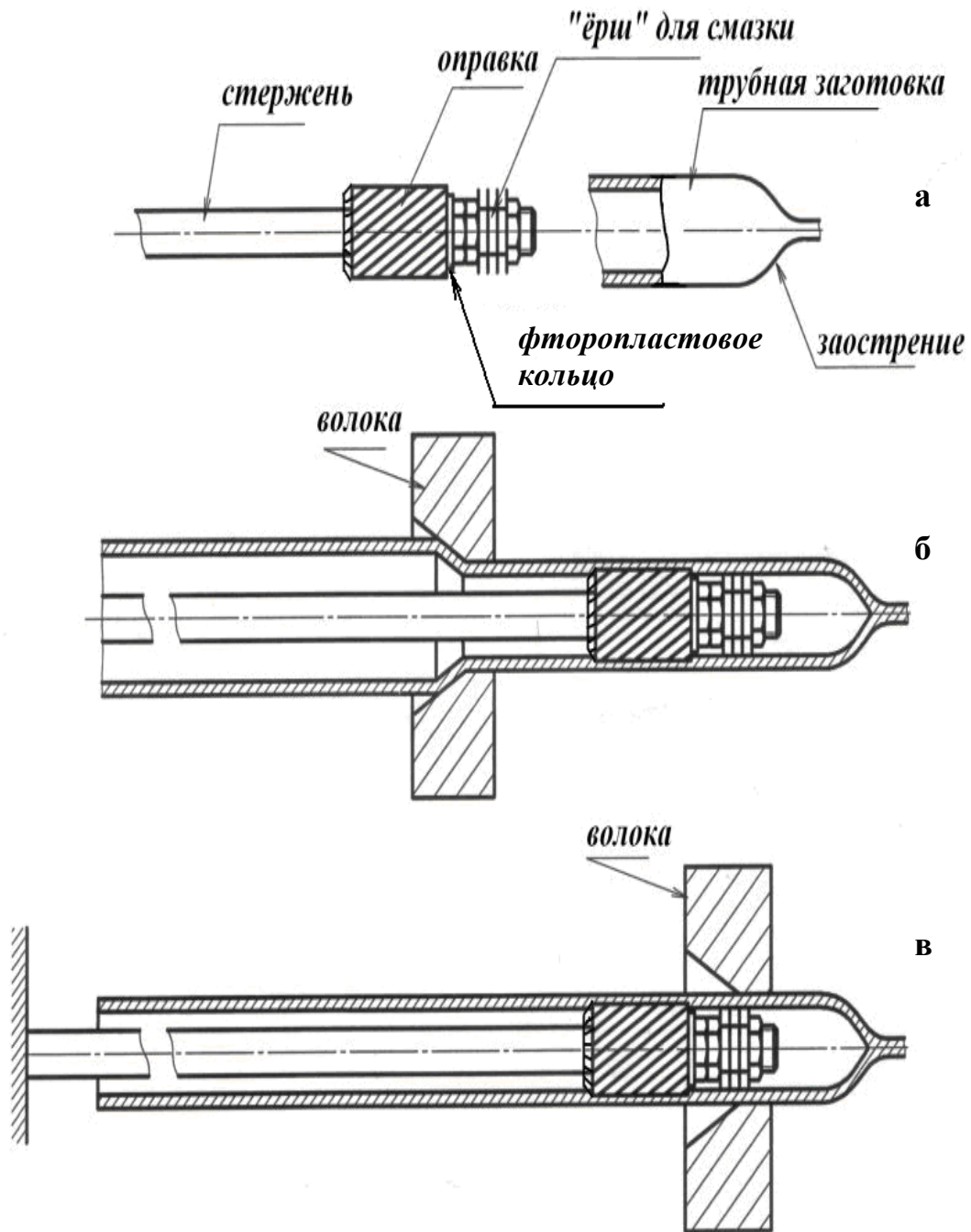


Рисунок 8 – Схема нового способа волочения труб с внутренним спиральным рифлением: а) установка стержня с оправкой внутри трубы; б) волочение; в) раздача.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана математическая модель безправочного волочения тонкостенных труб во вращающиеся волокна в плоскости, перпендикулярной к оси волочения, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние с учетом нелинейного упрочнения и анизотропии свойств материала трубы. Модель реализована в виде прикладной программы в среде программирования Delphi 7.0.

2. Экспериментальные и численные исследования безправочного волочения тонкостенных труб в неподвижные и вращаемые волокна показали удовлетворительную сходимость результатов теоретического анализа с экспериментальными данными. Погрешность расчета по напряжению волочения составляет 14%, по утолщению стенки трубы 20%.

3. С помощью моделирования процесса по математической модели и конечно-элементном комплексах ANSYS/LS DYNA и DEFORM-3D установлены особенности формоизменения тонкостенных труб во вращаемых волокнах: работа пластического формоизменения и результирующее напряжение волочения на протянутом участке не зависят от угловой скорости вращения волокна; по сравнению с волочением в неподвижные волокна осевые напряжения и деформации уменьшаются, а контактное давление в волокне и толщина стенки трубы увеличиваются.

4. Определена зависимость для расчета коэффициента вытяжки в осадочной волоке, что исключает поворот заготовки в эллиптической волоке, при скручивании трубы волочением через две дистанционно расположенные волокна.

5. Разработана методика расчета технологических параметров при пластическом скручивании труб волочением с учетом упругой разгрузки и устойчивости поперечного сечения.

6. Разработан способ изготовления труб с внутренним спиральным рифлением на свободно-вращаемой оправке, основанный на операциях волочения и раздачи, что обеспечивает безобрывность процесса за счет снижения усилия протягивания до 50%.

7. Предложена методика расчета технологических параметров при изготовлении тонкостенных труб с внутренним спиральным рифлением, обеспечивающая получение рифления требуемой высоты.

8. Изготовленная опытно-промышленная партия медных труб диаметром 15 мм с внутренним спиральным рифлением с высотой ребер 0,4 мм и углом подъема винтовой линии 20° показала перспективность предлагаемого способа.

Основное содержание диссертации опубликовано

в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Каргин, В.Р. Напряженно-деформированное состояние при безправочном волочении тонкостенных труб через вращаемые волокна [Текст]/В.Р. Каргин, Т.С. Пастушенко, Б.В. Каргин// Известия вузов. Цветная металлургия, 2009, №2, с.123-127.

2. Пастушенко, Т.С. Кручение в процессах волочения труб [Текст]/Т.С. Пастушенко, Б.В. Каргин//Современные наукоемкие технологии, 2008, №6, с.18-24.

3. Каргин, В.Р. Компьютерное моделирование безправочного волочения тонкостенных труб [Текст]/ В.Р. Каргин, Б.В. Каргин, Т.С. Пастушенко, Я.А. Ерисов //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2009, №1, с.72-79.

4. Каргин, Б.В. Исследование волочения труб с внутренним спиральным рифлением на короткой вращающейся оправке [Текст]/ Б.В. Каргин, В.Р. Каргин, Т.С. Пастушенко//Заготовительные производства в машиностроении,2009,№2, с.30-32.

В других изданиях

5. Пастушенко, Т.С. Пластическое закручивание труб при безоправочном волочении через две дистанционно расположенные волокни [Текст]/ Т.С. Пастушенко, Б.В. Каргин, В.Р. Каргин// Туполевские чтения,2008, с.74-75.

6. Пастушенко, Т.С. Способ внутреннего винтового оребрения труб волочением и раздачей на короткой вращающейся оправке [Текст]/Т.С. Пастушенко, Б.В. Каргин, В.Р. Каргин// Туполевские чтения,2008, с.73.

7. Пастушенко, Т.С. Анализ напряженно-деформированного состояния тонкостенной анизотропной среды при волочении с кручением [Текст]/Т.С. Пастушенко,В.Р. Каргин// Туполевские чтения,2006,с.82-83.

8. Каргин, В.Р. Численное моделирование безоправочного волочения тонкостенных труб с вращением волокни [Текст]/В.Р. Каргин, Т.С. Пастушенко, Я.А. Ерисов//Решетневские чтения,2007,с.176-177.

9. Ерисов, Я.А. Численный анализ безоправочного волочения тонкостенных труб [Текст]/ Я.А. Ерисов, Б.В. Каргин, Т.С. Пастушенко// Королевские чтения,2007, с.177.

10. Пастушенко, Т.С. Анализ безоправочного волочения тонкостенных труб через вращаемые волокни [Текст]/Т.С. Пастушенко, Б.В. Каргин, В.Р. Каргин// Актуальные проблемы авиации и космонавтики,2008,с. 81.

11. Каргин, В.Р. Компьютерное моделирование безоправочного волочения тонкостенных труб через вращаемую волоку[Текст]/В.Р.Каргин, Т.С. Пастушенко, Я.А. Ерисов//Сб. материалов IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения»-Томск:ТПУ,2008.-с.503-504.