

На правах рукописи



Панфилов Родион Геннадьевич

**ВОЛОЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ
ИЗ ДВУХСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ**

**Специальность 05.03.05 - Технологии и машины обработки
давлением**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2006

Работа выполнена на кафедре «Механика пластического формоизменения»
в ГОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Яковлев Сергей Петрович
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Семенов Евгений Иванович доктор технических наук, профессор Лялин Виктор Михайлович
Ведущая организация -	ОАО «Тульский научно-исследовательский технологический институт»

Защита состоится «*27*» июня 2006 г в 14 час на заседании диссертационного совета Д 212 271 01 при ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300600, г. Тула, ГСП, просп им Ленина, д 92, 4 корп , ауд. 203)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ГОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Автореферат разослан «*26*» мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Б. Орлов

2006А
14602

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В машиностроении и других отраслях промышленности широкое применение нашли трубчатые заготовки и трубы, к которым предъявляются высокие требования по качеству, точности геометрических размеров, чистоте поверхности, уровню механических свойств. Среди процессов волочения труб широко используются различные виды волочения: волочение без оправки, волочение на длинной (подвижной) и короткой (неподвижной) оправках со значительным и незначительным изменением диаметра трубной заготовки.

В результате пластической деформации достигается не только необходимое формоизменение, но и формируются необходимые механические свойства (предел текучести, предел прочности, показатели пластичности) в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации. Эти задачи следует решать при минимальном количестве технологических операций.

В машиностроении на современном этапе находят широкое применение двухслойные материалы, т.е. материалы, представляющие собой основной материал, который подвергается плакированию. Процессы пластического формоизменения двухслойных материалов в настоящее время мало изучены. Таким образом, развитие теории волочения труб из двухслойных материалов приобретает особую актуальность. Решению данной задачи посвящены выполненные исследования.

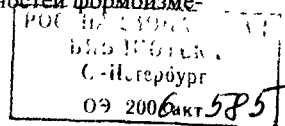
При разработке технологических процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинных (подвижных) и коротких (неподвижных) оправках в настоящее время используются эмпирические зависимости из различных справочных материалов, а также результаты теоретических исследований, в которых не в полной мере учитываются механические характеристики основного и плакирующего слоев, а также их взаимное влияние на силовые режимы и предельные возможности формоизменения.

Работа выполнена в соответствии с грантами Президента РФ на поддержку ведущих научных школ по выполнению научных исследований (гранты № НШ-1456.2003.8 и № НШ-4190.2006.8), грантом РФФИ № 05-01-96705 «Исследование закономерностей пластического деформирования изотропных и анизотропных упрочняющихся материалов при обработке давлением» (2005-2006 гг.) и научно-технической программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 гг.)» (проект № РНП 2.1.2.8355 «Создание научных основ формирования свойств изделий общего и специального назначения методами комбинированного термопластического деформирования материалов»).

Цель работы. Интенсификация процессов волочения труб из двухслойных материалов с утонением стенки за счет разработки научно обоснованных режимов технологии, обеспечивающих формирование требуемых механических свойств материала трубы и удовлетворяющих техническим условиям их эксплуатации и последующей переработки.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи исследований:**

➤ получить основные уравнения и соотношения, необходимые для анализа кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формоизме-



нения процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинной и короткой оправках,

- выполнить теоретические исследования процессов волочения труб с утонением стенки из двухслойных материалов на длинной и короткой оправках;

- установить влияние геометрических параметров заготовки и инструмента, степени деформации, толщины основного и плакирующего слоев, условий трения контактных поверхностей инструмента и трубы на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния трубы, формирование показателей качества механических свойств материалов труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств) силовых режимы и предельные возможности формоизменения;

- осуществить экспериментальные исследования силовых режимов волочения труб из двухслойных материалов на длинных оправках;

- использовать результаты исследований в промышленности, для чего разработать рекомендации по расчету и проектированию технологических процессов волочения труб из двухслойных материалов, а также в учебном процессе при подготовке новых курсов, при выполнении исследовательских курсовых и дипломных проектов студентами

Методы исследования. Теоретические исследования процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках выполнены с использованием основных положений механики сплошных сред и теории течения неупругого изотропного тела. Анализ кинематики течения, напряженного и деформированного состояний заготовки при вытяжке с утонением стенки выполнен численно методом конечно-разностных соотношений с использованием ЭВМ. Предельные возможности формоизменения оценены по величине максимального растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации и степени использования ресурса пластичности. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных испытательных машин (универсальная испытательная машина «МИРИ-200К», испытательные машины Р-5 и ГМС-50) и регистрирующей аппаратуры; обработка опытных данных осуществлялась с применением методов математической статистики.

Автор защищает математические модели процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках, учитывающие механические характеристики основного и плакирующего слоев; результаты теоретических и экспериментальных исследований кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний труб; формирование показателей качества механических свойств материалов труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств), силовых режимов и предельных возможностей формоизменения; рекомендации по расчету и проектированию технологических процессов волочения труб из двухслойных материалов.

Научная новизна: разработаны основные уравнения и соотношения, необходимые для анализа кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения в процессах волочения труб из двухслойных материалов на длинной и короткой оправках с учетом механических характеристик основного и плакирующего слоев выявлены закономерности изменения

кинematике течения материала, напряженного и деформированного состояний трубы, показателей качества механических свойств материалов труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств), силовых режимов и предельных возможностей формоизменения в зависимости от геометрических параметров заготовки и инструмента, степени деформации, механических свойств и толщин основного и плакирующего слоев двухслойного материала, условий трения контактных поверхностей инструмента и трубы.

Достоверность результатов обеспечена обоснованным использованием полученных теоретических зависимостей, принятых допущений и ограничений, корректностью постановки задач, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, а также практическим использованием результатов работы в опытном производстве.

Практическая значимость. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации и создано программное обеспечение для ЭВМ по расчету технологических параметров процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках.

Реализация работы. Рекомендации по расчету технологических параметров процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках использованы при проектировании технологических процессов, инструмента и оснастки для изготовления и передела труб различных типоразмеров и внедрены в опытном производстве на закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева». Технологические процессы волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках обеспечивают заданное качество труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств) и надежность их эксплуатации (повышение коррозионной стойкости и прочности), уменьшение трудоемкости их изготовления и сокращение сроков подготовки производства, снижение брака.

Отдельные материалы научных исследований использованы в научно-исследовательской работе студентов, при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также в лекционных курсах «Основы теории пластичности и ползучести» и «Механика процессов пластического формоизменения» для бакалавров техники и технологии направления 150400 «Технологические машины и оборудование» и студентов, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением».

Апробация работы. Результаты исследований доложены на международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (г. Тула: ТулГУ, 2004 г.); на международной научно-технической конференции «Творческое наследие профессора В.Ф. Прейса» (г. Тула, 2006 г.), на XXX - XXXII международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2004-2006 г.г.), а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Тульского государственного университета (г. Тула, 2002 - 2006 г.г.).

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 10 печатных работах. Общий объем - 3,26 печ. л., авторский вклад - 1,9 печ. л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения и пяти разделов, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 101 странице машинописного текста, содержит 48 рисунка, 2 таблицы и 143 наименования библиографического списка. Общий объем работы - 160 страниц.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., проф. С.С. Яковлеву и д.т.н., доц. В.И. Трегубову за оказанные консультации при выполнении работы, критические замечания и рекомендации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе научно-технической задачи, сформулированы цель работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна, методы исследования, практическая ценность и реализация работы, приводятся данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертационной работы и краткое содержание разделов диссертации.

В первом разделе рассмотрено современное состояние теории и технологии процессов волочения труб из одно- и многослойных материалов. Обоснована постановка задач исследований.

Значительный вклад в развитие теории пластичности, методов анализа процессов обработки металлов давлением, теории волочения труб из изотропного и анизотропного материалов и их применения в промышленности внесли Ю.А. Алюшин, А.А. Богатов, С.И. Борисов, Я.Л. Ваткин, Ф.В. Гречников, С.И. Губкин, Г.С. Гун, Г.Я. Гун, Г.Д. Дель, А.М. Дмитриев, П.Т. Емельяненко, Г. Закс, В.А. Жарков, Б.Д. Жуковский, А.А. Ильюшин, Ю.Г. Калпин, Л.М. Качанов, В.Л. Колмогоров, В.Д. Кухарь, Н.Н. Калинин, Ю.М. Матвеев, А.Д. Матвеев, И.А. Норицин, А.Г. Овчинников, В.А. Огородников, В.Я. Остренко, И.М. Павлов, О.А. Плячковский, Е.А. Попов, П.И. Полухин, И.Н. Поталов, И.П. Ренне, В.Л. Романовский, Ф.И. Рузанов, Г.А. Савин, Г. Свифт, Е.И. Семенов, В.С. Смирнов, Л.Г. Степанский, П.К. Тетерин, А.Д. Томленов, Е.П. Унксов, Я.С. Финкельштейн, И.А. Фомичев, Р. Хилл, А.И. Целиков, А.П. Чекмарев, Ю.Ф. Шевакин, Л.А. Шофман, А.А. Шевченко и другие. В работах этих ученых разработаны и усовершенствованы методы анализа процессов пластического формоизменения, даны примеры их применения к анализу процессов обработки металлов давлением.

Вопросы теории и технологии деформирования многослойных материалов рассмотрены в работах Г.Э. Аркулуса, М.Я. Бровмана, Ю.С. Додина, П.Ф. Засухи, В.Д. Коршикова, А.А. Ершова, В.К. Короля, В. Ольшака, И.Л. Перлина, Я. Рыхлевского, А.Л. Тарновского, В. Урбановского и других.

Несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов волочения труб, вопросы теории формоизменения двухслойных материалов в настоящее время практически не разработаны. Мало внимания уделяется в научно-технической литературе исследованиям кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовым режимам и предельным возможностям деформирования процессов волочения труб из двухслойных материалов на длин-

ной и короткой оправках.

На основе проведенного обзора работ следует, что расчет технологических процессов волочения двухслойных материалов в настоящее время осуществляется на основе механических свойств основного слоя или введением понятия долевого напряжения. Однако указанные предположения не позволяют оценить влияние механических свойств как основного, так и плакирующего слоев на силовые режимы и предельные возможности формоизменения.

Широкий круг вопросов, связанных с проектированием технологических процессов волочения труб из двухслойных материалов и отысканием рациональных условий ведения этих процессов, обеспечивающих заданное качество их изготовления, не решен.

Во втором разделе приводятся основные уравнения и соотношения, необходимые для анализа кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинной и короткой оправках.

На основе предложенного подхода к анализу процесса формообразования двухслойных материалов в условиях плоского деформированного состояния в клиновом канале на кафедре «Механика пластического формоизменения» с участием автора выполнены теоретические исследования процессов волочения труб на длинных и коротких оправках [1-6, 8-12].

Рассмотрены процессы волочения труб на длинной (подвижной) и короткой (неподвижной) оправках из изотропного неупрочняющегося материала. Трубная заготовка - двухслойная из разных материалов с различными механическими свойствами (рис. 1).

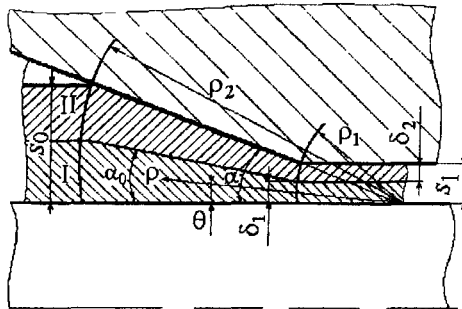


Рис. 1. Схема к расчету напряженного и деформированного состояний трубы

Отношение диаметра трубы к толщине стенки более 20. Принимается, что процесс реализуется в условиях плоского деформированного состояния. Рассматривается плоское радиальное течение материала. На контактных поверхностях трубы и инструмента задаются касательные напряжения по закону Кулона. Изменение направления скоростей течения материала на границе очага пластической деформации при входе в него и выходе из него учитывается из-

менением величины радиального напряжения по методу баланса мощностей. Реализуется приближенное решение этой задачи с привлечением уравнения равновесия, условия несжимаемости материала, уравнений теории течения (ен-Венана-Леви-Мизеса). При приближенном решении задачи принимается коэффициент жесткости μ_k как функция координаты ρ в каждой из пластических областей (внутреннем и внешнем слоях). С привлечением уравнения связи между напряжениями и скоростями деформации интегрируются уравнения равновесия в каждом слое. Этим достигается разделение переменных по скоростям течения и напряжениям.

Величину радиальной скорости V_ρ предложено определять по выражению

$$V_\rho = \Phi_k(\theta)/\rho, \quad \Phi_k(\theta) = A_k e^{2\theta} + B_k e^{-2\theta} - D_k/4, \quad (1)$$

где k принимает значения $k=1,2$ в зависимости от рассматриваемого слоя, A_k, B_k, D_k - константы.

Компоненты напряжений в очаге пластической деформации в каждом слое вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho k} &= \sigma_k + 2\mu_{ik}\xi_{\rho k} = -6\beta_k(A_k e^{2\theta} + B_k e^{-2\theta} - D_k/4) - \beta_k D_k \ln \rho - C_k, \\ \sigma_{\theta k} &= \sigma_k + 2\mu_{ik}\xi_{\theta k} = -2\beta_k(A_k e^{2\theta} + B_k e^{-2\theta} - D_k/4) - \beta_k D_k \ln \rho - C_k, \\ \tau_{\rho\theta k} &= \mu_{ik} \frac{\Phi'_k(\theta)}{\rho^2} = 2\beta_k(A_k e^{2\theta} - B_k e^{-2\theta}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } \mu_{11} = \frac{\sigma_{s1}\rho^2\alpha_0}{2\sqrt{3}V_0\delta_1}, \quad \mu_{12} = \frac{\sigma_{s2}\rho^2(\alpha - \alpha_0)}{2\sqrt{3}V_0\delta_2}, \quad \beta_1 = \frac{\sigma_{s1}\alpha_0}{2\sqrt{3}V_0\delta_1}; \quad \beta_2 = \frac{\sigma_{s2}(\alpha - \alpha_0)}{2\sqrt{3}V_0\delta_2},$$

C_k - константы; σ_k - среднее напряжение в k -ом слое.

Восемь постоянных A_k, B_k, C_k, D_k определяются из следующих условий.

1. Постоянство расхода металла

$$\int_0^{\alpha_0} V_{\rho 1} \rho d\theta + \int_{\alpha_0}^{\alpha} V_{\rho 2} \rho d\theta = -V_0(\delta_1 + \delta_2)$$

2. Непрерывность скоростей течения металла на границе раздела слоев металла

$$V_{\rho 1}(\rho, \alpha_0) = V_{\rho 2}(\rho, \alpha_0).$$

3, 4. Непрерывность напряжений σ_θ на границе раздела слоев

$$\sigma_{\theta 1}(\rho, \alpha_0) = \sigma_{\theta 2}(\rho, \alpha_0).$$

5. Непрерывность касательных напряжений, возникающих на границе раздела слоев металла,

$$\tau_{\rho\theta 1}(\rho, \alpha_0) = \tau_{\rho\theta 2}(\rho, \alpha_0).$$

6. На контактной поверхности трубы с оправкой реализуется закон трения Кулона

- при волочении на длинной оправке

$$\tau_{\rho\theta 1}(\rho, 0) = -\mu_o \sigma_{\theta 1}(\rho, 0);$$

- при волочении на короткой оправке

$$\tau_{\rho\theta 1}(\rho, 0) = \mu_o \sigma_{\theta 1}(\rho, 0)$$

7. На контактной поверхности трубы с волокой реализуется закон трения Кулона

$$\tau_{\rho\theta 2}(\rho, \alpha) = -\mu_{\theta} \sigma_{\theta 2}(\rho, \alpha).$$

8. Учет изменения направления течения материала на входе в очаг пластической деформации в первом и втором слоях оцениваем по наибольшей величине угла поворота:

$$\sigma_{\rho 1}(\rho_2, \alpha_0) = \frac{\sigma_{s1}}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_0, \quad \text{если } \sigma_{s1} < \sigma_{s2};$$

$$\sigma_{\rho 2}(\rho_2, \alpha) = \frac{\sigma_{s2}}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha, \quad \text{если } \sigma_{s1} > \sigma_{s2},$$

где μ_{θ} и μ_o - коэффициенты трения на контактных поверхностях волоки и оправки соответственно.

Экспериментальные исследования волочения двухслойных труб показали, что разрушение наблюдается, как правило, в менее прочном слое металла. Поэтому исследование напряженного и деформированного состояний нужно, прежде всего, начинать в этом слое.

Силу P процесса определяли следующим образом:

- при волочении на длинной оправке

$$P = P_1 + P_2 + P_{mp}; \quad (3)$$

- при волочении на короткой оправке

$$P = P_1 + P_2, \quad (4)$$

где $P_1 = \pi(d_o + \delta_1)P_{x1}$ - сила в первом слое, $P_2 = \pi(d_o + 2\delta_1 + \delta_2)P_{x2}$ - сила во втором слое; $P_{mp} = \pi\mu_o d_o \int_{\rho_1}^{\rho_2} |\sigma_{\theta 1}(\rho, 0)| d\rho$, d_o - диаметр оправки; δ_1 и δ_2 - толщина первого и второго слоя в готовой трубе соответственно.

Выражения для вычисления величин P_{x1} и P_{x2} в первом и втором слоях двухслойного материала запишутся соответственно:

$$P_{x1} = -2A_1\beta_1\rho_1[e^{2\alpha_0}(\cos\alpha_0 + \sin\alpha_0) - 1] + 2B_1\beta_1\rho_1[e^{-2\alpha_0}(\cos\alpha_0 - \sin\alpha_0) - 1] + [D_1\beta_1(\frac{3}{2} - \ln\rho_1) - C_1]\rho_1 \sin\alpha_0 + \frac{\sigma_{s1}}{\sqrt{3}} \operatorname{tg}\alpha_0\rho_1 \sin\alpha_0;$$

$$P_{x2} = -2A_2\beta_2\rho_1[e^{2\alpha}(\cos\alpha + \sin\alpha) - e^{2\alpha_0}(\cos\alpha_0 + \sin\alpha_0)] + 2B_2\beta_2\rho_1[e^{-2\alpha}(\cos\alpha - \sin\alpha) - e^{-2\alpha_0}(\cos\alpha_0 - \sin\alpha_0)] + [D_2\beta_2(\frac{3}{2} - \ln\rho_1) - C_2]\rho_1(\sin\alpha - \sin\alpha_0) + \frac{\sigma_{s2}}{\sqrt{3}} \operatorname{tg}\alpha\rho_1(\sin\alpha - \sin\alpha_0).$$

В последних формулах учитываются приращения напряжения σ_x , связанного с максимальным поворотом направления течения материала на выходе из очага деформации.

Выражение для определения интенсивности скоростей деформаций ξ_{ik} запишется так:

$$\xi_{ik} = \frac{\sqrt{4\Phi_k^2(\theta) + \Phi_k'^2(\theta)}}{\sqrt{3}\rho^2}, \quad k = 1, 2, \quad (5)$$

где $\Phi'_k(\theta) = 2(A_k e^{2\theta} - B_k e^{-2\theta})$

При установившемся процессе волочения труб с утонением стенки траектории и линии тока локальных объемов частичек металла совпадают, и величины накопленных интенсивностей деформаций при их перемещении будут определяться вдоль линий тока $\theta = const$ в очаге пластической деформации по выражению

$$\varepsilon_{ik} = \int_0^l \xi_{ik} dt + \Delta\varepsilon_{ik}(\rho_2) = \int_{\rho_2}^{\rho} \xi_{ik} \frac{d\rho}{V_{\rho k}} + \left| \frac{\Delta V_{\tau k}(\rho_2)}{\sqrt{3} V_{\rho k}(\rho_2)} \right|, \quad (6)$$

где $\Delta\varepsilon_{ik}(\rho_2)$ - приращение интенсивности деформаций при входе локального объема материала в очаг пластической деформации; $\Delta V_{\tau k}(\rho_2)$ - величина разрыва касательной составляющей скорости при входе локального объема металла в очаг деформации; $V_{\rho k}(\rho_2)$ - величина радиальной скорости при $\rho = \rho_2$, $dt = d\rho_k / V_{\rho k}$.

Накопленная интенсивность деформации в стенке трубы ε_{ik} при $\theta = const$ определим по формуле

$$\varepsilon_{ik} = - \frac{\sqrt{4\Phi_k^2(\theta) + \Phi_k'^2(\theta)}}{\sqrt{3}\Phi_k(\theta)} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{2tg\theta}{\sqrt{3}}. \quad (7)$$

Средняя величина накопленной полной интенсивности деформации в каждом слое очага деформации определится по формулам

$$\varepsilon_{i1cp} = - \frac{1}{\sqrt{3}\alpha_0} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \int_0^{\alpha_0} \frac{\sqrt{4\Phi_1^2(\theta) + \Phi_1'^2(\theta)}}{\Phi_1(\theta)} d\theta - \frac{\ln(\cos\alpha_0)}{\sqrt{3}\alpha_0};$$

$$\varepsilon_{i2cp} = - \frac{1}{\sqrt{3}(\alpha - \alpha_0)} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \int_0^{\alpha} \frac{\sqrt{4\Phi_2^2(\theta) + \Phi_2'^2(\theta)}}{\Phi_2(\theta)} d\theta - \frac{1}{\sqrt{3}(\alpha - \alpha_0)} \ln \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_0}.$$

Средние значения σ_{s1cp} и σ_{s2cp} в очаге деформации вычисляются по формулам

$$\sigma_{s1cp} = \sigma_{0,2_1} + Q_1(\varepsilon_{i1cp})^{n_1}; \quad \sigma_{s2cp} = \sigma_{0,2_2} + Q_2(\varepsilon_{i2cp})^{n_2},$$

а далее следует повторить решение задачи уже с учетом упрочнения материала, где Q_1 , Q_2 , n_1 и n_2 - константы кривых упрочнения основного и плакирующего слоев материала соответственно.

Повреждаемости материала ω_e при пластическом деформировании вычислялась по формуле

$$\omega_e = \int_{\varepsilon_{ib}}^{\varepsilon_l} \frac{d\varepsilon_l}{\varepsilon_{l,np}}, \quad (8)$$

где ε_{ib} - интенсивность деформации элементарного объема при входе в очаг деформации; $\varepsilon_{l,np} = \varepsilon_{l,np}(\sigma/\sigma_l)$ - предельная интенсивность деформации; σ - среднее напряжение; σ_l - интенсивность напряжения

Предельная интенсивность деформации $\varepsilon_{l,np}$ находится по выражению

$$\varepsilon_{i, np} = \Omega_k \exp\left(t_{i, k} \frac{\sigma}{\sigma_i}\right), \quad (9)$$

где Ω_k , U_k - константы основного и плакирующего слоев материала, определяемые в зависимости от рода материала, согласно работам В Л Колмогорова и А.А. Богатова.

Полученные соотношения для анализа процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинной и короткой оправках позволили установить влияние технологических параметров на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности формообразования исследуемых процессов

В третьем разделе изложены результаты теоретических исследований кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний труб, формирования показателей качества механических свойств материалов труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств), силовых режимов и предельных возможностей формоизменения при волочении двухслойных труб на короткой (неподвижной) оправке

Кинематика течения материала, напряженного и деформированного состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности волочения труб из двухслойных материалов на коротких оправках исследовались численно на ЭВМ в зависимости от коэффициента утонения $m_s = s_1 / s_0$, угла конусности волокна $\alpha = 6...30^\circ$ и условий трения на инструменте $\mu_o = (1 - 4)\mu_g$ при $\mu_g = 0,05$.

Анализ результатов расчета показал, что с уменьшением величины ρ и уменьшением угла θ относительная радиальная скорость $\bar{V}_\rho = V_\rho / V_0$ возрастает, приближаясь к величине относительной скорости перемещения трубы V_0 .

Установлено, что относительная величина радиального напряжения $\bar{\sigma}_\rho = \sigma_\rho / (\sigma_{0,2})_2$ имеет разрыв при $\theta = \alpha_0$, что объясняется разными механическими свойствами материала первого и второго слоев, а величины тангенциальных $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / (\sigma_{0,2})_2$ и касательных напряжений $\bar{\tau}_{\rho\theta} = \tau_{\rho\theta} / [(\sigma_{0,2})_2 / \sqrt{3}]$ непрерывны. С уменьшением радиуса ρ относительная величина радиального напряжения $\bar{\sigma}_\rho$ увеличивается, $\bar{\sigma}_\theta$ уменьшается по абсолютной величине ($\theta = const$). Увеличение угла конусности волокна α и уменьшение коэффициента утонения m_s сопровождается ростом относительного радиального $\bar{\sigma}_\rho$ и уменьшением тангенциального $\bar{\sigma}_\theta$ напряжений (по абсолютной величине).

На рис. 2 приведены зависимости изменения относительной величины силы $\bar{P} = P / [\pi(d_1 + s_1)s_1(\sigma_{0,2})_2]$ от угла конусности волокна α при фиксированных величинах коэффициента утонения m_s и коэффициенте трения на оправке μ_o ($\mu_g = 0,05; \mu_o = 2\mu_g = 0,1; \delta_{01}/s_0 = 0,25; s_0 = 4$ мм) Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с уменьшением коэффициента утонения m_s относительная величина силы \bar{P} возрастает. Учет упрочнения существенно уточняет относительную величину силы \bar{P} , однако не изменяет характер влияния угла конусности волокна α , коэффициента утонения m_s и условий трения

на контактных поверхностях рабочего инструмента и трубы (μ_o/μ_θ)

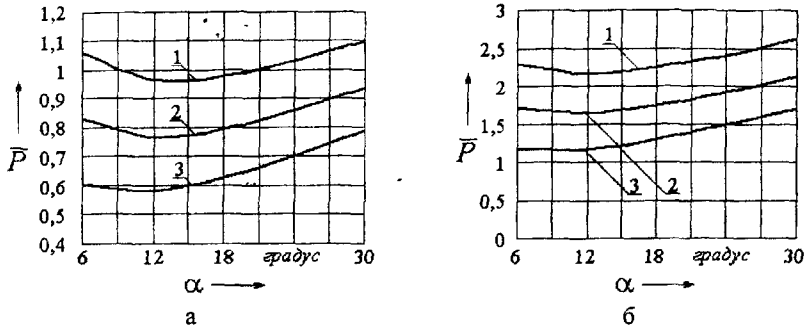


Рис. 2. Зависимость изменения \bar{P} от α для двухслойной стали 20К+12Х18Н10Т: а – без учета упрочнения; б – с учетом упрочнения; кривая 1 - $m_s = 0,6$; кривая 2 - $m_s = 0,7$; кривая 3 - $m_s = 0,8$

Для двухслойной стали 20К+12Х18Н10Т выявлены оптимальные углы конусности волокни в пределах 10... 20°, соответствующие наименьшей величине силы, при коэффициентах утонения $m_s < 0,75$. Если величины коэффициентов утонения $m_s > 0,8$, величина оптимальных углов конусности волокни α с увеличением коэффициента утонения m_s смещается в сторону меньших углов.

Графические зависимости изменения относительной величины силы \bar{P} от величины δ_{01}/s_0 при волочении труб из стали 12Х3ГНМФБА+12Х18Н10Т приведены на рис. 3 ($\mu_o = 2\mu_\theta = 0,1$; $s_0 = 4$ мм; $m_s = 0,7$). Анализ графиков показывает, что с ростом величины δ_{01}/s_0 относительная величина силы \bar{P} увеличивается. В ряде случаев волочения труб из двухслойных материалов может наблюдаться и обратный характер изменения относительной величины \bar{P} . Этот факт зависит от способности того или иного материала к деформационному упрочнению, а также величины коэффициента утонения m_s .

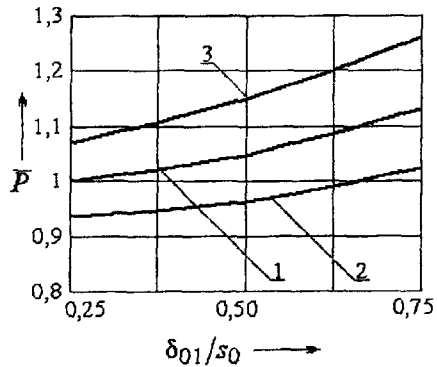


Рис. 3. Зависимость изменения \bar{P} от δ_{01}/s_0 : кривая 1 - $\alpha = 6^\circ$; кривая 2 - $\alpha = 18^\circ$; кривая 3 - $\alpha = 30^\circ$

Графические зависимости изменения накопленной величины повреждаемости материала ω_e в очаге пластической деформации от относительного радиуса $\bar{\rho}$ для двухслойной стали 12Х3НМФБА-10Х13 приведены на рис. 4. Здесь кривая 1 соответствует результатам расчета величины повреждаемости ω_e для сечения $\theta = 0^\circ$; кривая 2 - для $\theta = \alpha_0$ (слой 1); кривая 3 - для $\theta = \alpha_0$ (слой 2); кривая 4 - для $\theta = \alpha$; $\bar{\rho} = \rho/s_0$. Расчеты выполнены при $\mu_0 = 2\mu_\theta = 0,1$; $\mu_\theta = 0,05$; $s_0 = 4$ мм; $\delta_{01}/s_0 = 0,5$, $\alpha = 30^\circ$, $m_s = 0,7$.

С уменьшением относительного радиуса $\bar{\rho}$ величина повреждаемости ω_e интенсивно возрастает для исследуемых двухслойных материалов.

Максимальная величина ω_e для исследуемых двухслойных материалов соответствует сечению $\theta = \alpha$ (слой 2).

Рост относительной величины δ_{01}/s_0 приводит к более равномерному распределению ω_e по толщине изготавливаемой трубы. Расчеты показали, что с уменьшением коэффициента утонения m_s и увеличением угла конусности волокна α максимальная величина ω_e на выходе из очага пластической деформации возрастает. Расчеты показали, что учет упрочнения материала в процессе пластического формоизменения повышает величину накопленных микрповреждений ω_e .

Оценена величина неоднородности интенсивности деформации $\delta_\varepsilon = (\varepsilon_{i \max} - \varepsilon_{i \min})/\varepsilon_{i \max}$ и напряжений $\delta_\sigma = (\sigma_{i \max} - \sigma_{i \min})/\sigma_{i \max}$ от технологических параметров процесса волочения на короткой оправке. Здесь $\varepsilon_{i \max}$ и $\varepsilon_{i \min}$, $\sigma_{i \max}$ и $\sigma_{i \min}$ - максимальная и минимальная величины интенсивностей деформации и напряжений по толщине стенки трубы. Расчеты показали, что величина неоднородности интенсивности деформации δ_ε и напряжений δ_σ в стенке трубы с уменьшением угла конусности волокна α и коэффициента утонения m_s падает, что говорит о более благоприятных условиях формирования механических свойств материала стенки изготавливаемой трубы.

Предельные возможности процесса волочения ограничиваются максимальной величиной осевого напряжения σ_x в стенке трубы на выходе из очага деформации, которая не должна превышать величины сопротивления материала пластическому деформированию в условиях плоского деформированного состояния с учетом упрочнения

$$\sigma_{x1} \leq \sigma_{s1}^*, \quad \sigma_{s1}^* = 2\sigma_{s1}/\sqrt{3}, \quad (10)$$

и допустимой степенью использования ресурса пластичности

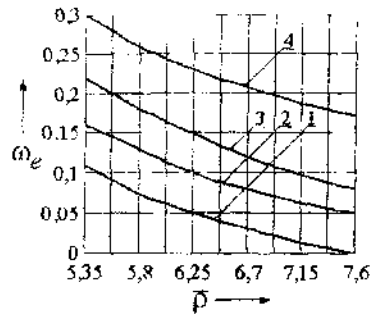


Рис. 4 Зависимость изменения ω_e от $\bar{\rho}$: кривая 1 - $\theta = 0$; кривая 2 - $\theta = \alpha_0$ (слой 1); кривая 3 - $\theta = \alpha_0$ (слой 2), кривая 4 - $\theta = \alpha$

$$\omega_e = \int_{\varepsilon_{ib}}^{\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{i np}} \leq \chi, \quad (11)$$

где $i = 1, 2$ в зависимости от рассматриваемого слоя заготовки.

Графические зависимости изменения предельных коэффициентов утонения $m_{s np}$, вычисленных по первому (10) и второму (11) критериям разрушения, от угла конусности волокни α для двухслойной стали 12ХЗГНМФБА+10Х13 приведены на рис 5 соответственно ($\mu_o = 2\mu_g = 0,1$; $\delta_{01}/s_0 = 0,25$; $s_0 = 4$ мм).

Здесь кривая 1 соответствует величине $m_{s np}$, определенной по максимальной величине осевого напряжения на выходе из очага пластической деформации (10); кривая 2 соответствует величине $m_{s np}$, определенной по степени использования ресурса пластичности (11) при $\chi = 1$; кривая 3 – при $\chi = 0,65$; кривая 4 – при $\chi = 0,25$. Положения кривых 1 - 4 определяют возможности деформирования заготовки в зависимости от технических требований на изделие.

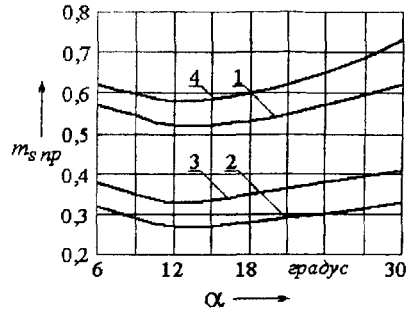


Рис. 5 Зависимость $m_{s np}$ от угла конусности волокни α

Положения кривых 1 и 2 указывают на возможность разрушения заготовки по максимальной величине растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации (10), по степени использования ресурса пластичности (11) при $\chi = 1$.

Выявлено существование оптимальных углов конусности волокни в пределах 10... 18°, соответствующих наименьшей величине коэффициента утонения $m_{s np}$, осевого напряжения на выходе из очага пластической деформации и силы процесса. Предельные возможности формоизменения процесса волочения труб на короткой оправке из двухслойных материалов ограничиваются максимальной величиной растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации для исследуемых труб из двухслойных материалов.

Показано, что учет упрочнения существенно уточняет величину силы исследуемого процесса волочения и предельный коэффициент утонения, однако не изменяет характер влияния угла конусности волокни α и условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и трубы (μ_o/μ_g).

Четвертый раздел посвящен теоретическим исследованиям волочения труб из двухслойных материалов на длинной (подвижной) оправке. Установлены закономерности влияния геометрических параметров заготовки и инструмента, степени деформации, механических свойств и толщин основного и плакирующего слоев двухслойного материала, условий трения контактных поверхностей инструмента и трубы на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния трубы, показатели качества механических

свойств материалов труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств), силовые режимы и предельные возможности формоизменения процесса волочения труб на длинных оправках

Зависимости изменения относительной величины силы $\bar{P} = P / [\pi(d_1 + s_1)s_1(\sigma_{0,2})^2]$ от угла конусности волоки α приведены на рис 6 ($\mu_o = 2\mu_\theta = 0,1$; $\delta_{01}/s_0 = 0,25$, $s_0 = 4$ мм)

Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с уменьшением коэффициента утонения m_s и увеличением угла конусности волоки α относительная величина силы \bar{P} возрастают. Интенсивность роста тем выше, чем меньше коэффициент утонения m_s .

Установлено, что изменение условия трения на контактной поверхности оправки существенно влияет на относительную величину силы \bar{P} . С ростом коэффициента трения на оправке μ_o (при $\mu_\theta = 0,05$) величина относительной силы \bar{P} возрастает

Этот эффект проявляется существенно на малых углах конусности волоки α и величинах коэффициента утонения m_s , при углах конусности волоки $\alpha = 30^\circ$ увеличение коэффициента трения на оправке в четыре раза по сравнению с коэффициентом трения на волоке приводит к незначительному (около 5 %) изменению относительной величины силы \bar{P}

Графические зависимости изменения предельных коэффициентов утонения m_{snp} , вычисленных по первому (10) и второму (11) критериям разрушения, от угла конусности волоки α для двухслойной стали 12ХЗГНМФБА+10Х13 приведены на рис. 7. Здесь кривая 1 соответствует величине m_{snp} , определенной по максимальной величине осевого напряжения на выходе из очага пластической деформации (10); кривая 2 соответствует величине m_{snp} , определенной по степени использования ресурса пластичности (11) при $\chi = 1$; кривая 3 - при $\chi = 0,65$, кривая 4 - при $\chi = 0,25$

Показано, что с ростом угла конусности волоки α величина предельного коэффициента утонения m_{snp} увеличивается. Так увеличение угла конусности

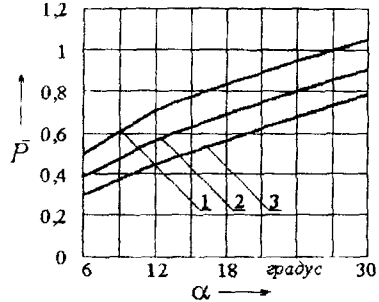


Рис 6. Зависимость изменения \bar{P} от α для стали 12ХЗГНМФБА+10Х13:
кривая 1 - $m_s = 0,6$;
кривая 2 - $m_s = 0,7$;
кривая 3 - $m_s = 0,8$

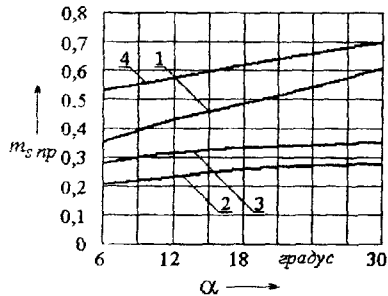


Рис. 7. Зависимость m_{snp} от угла конусности волоки α ($\mu_o = 2\mu_\theta = 0,1$;
 $\delta_{01}/s_0 = 0,25$, $s_0 = 4$ мм)

волоки от 6 до 30° сопровождается ростом величины $m_{s, np}$ на 40 %. Установлено, что величины предельных коэффициентов утонения $m_{s, np}$, вычисленные с учетом упрочнения материала, больше, чем без учета упрочнения. Различие предельных коэффициентов утонения $m_{s, np}$, определенных с учетом и без учета упрочнения материала, составляет около 15 %.

В пятом разделе приведены результаты экспериментальных исследований механических свойств двухслойного материала 12ХЗГНМФБА+08Х13, силовых режимов волочения труб на длинной оправке из этой двухслойной стали с разной толщиной стенки основного и плакирующего материалов [7]. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований по силовым режимам процесса волочения труб на длинной оправке с утонением стенки из двухслойных материалов указывает на удовлетворительное их согласование.

Изложены рекомендации по расчету технологических параметров процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках. Рекомендации использованы на закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева» в опытном производстве при проектировании технологических процессов, инструмента и оснастки для получения труб различных типоразмеров из двухслойных материалов типа 12ХЗГНМФБА+10Х13, 20К+12Х18Н10Т, 12ХЗГНМФБА+12Х18Н10Т и т.д. Технологические процессы волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках обеспечивают заданное качество труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств) и надежность их эксплуатации (повышение коррозионной стойкости и прочности), уменьшение трудоемкости их изготовления и сокращение сроков подготовки производства, снижение брака. Результаты научных исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное народнохозяйственное значение и состоящая в разработке научно обоснованных режимов процессов волочения труб с утонением стенки на оправках из двухслойных материалов, которые обеспечивают их интенсификацию и формирование механических свойств материала трубы, удовлетворяющих техническим условиям их эксплуатации и последующей переработки.

В процессе теоретического и экспериментального исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1 Разработаны математические модели процессов волочения труб из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках в конических волоках. Получены основные уравнения и соотношения, необходимые для анализа кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения процессов волочения труб из двухслойных материалов на оправках с учетом

механических характеристик основного и плакирующего слоев. Разработаны алгоритм расчета силовых, деформационных параметров и предельных возможностей формоизменения, а также программное обеспечение для ЭВМ.

2. На основе разработанных математических моделей деформирования выполнены теоретические исследования процесса волочения труб с утонением стенки из двухслойных материалов на длинной и короткой оправках. Оценено влияние геометрических параметров трубы и инструмента, степени деформации, толщины основного и плакирующего слоев, условий трения контактных поверхностей инструмента и трубы на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния трубы, формирование показателей качества механических свойств материалов труб (степени использования ресурса пластичности и однородности механических свойств), силовые режимы и предельные возможности формоизменения.

3. Установлено, что с уменьшением величин ρ и θ при волочении двухслойных труб на короткой оправке и уменьшением величин ρ и увеличением θ при волочении труб на длинной оправке радиальная скорость V_ρ возрастает, приближаясь к величине скорости V_0 . Показано, что увеличение угла конусности волокна α и уменьшение коэффициента утонения m_s сопровождаются ростом относительного радиального $\bar{\sigma}_\rho$ и уменьшением тангенциального $\bar{\sigma}_\theta$ напряжений (по абсолютной величине).

4. Исследованы силовые режимы волочения труб из двухслойных материалов на коротких и длинных оправках в зависимости от коэффициента утонения, условий трения контактных поверхностей инструмента и трубы, толщины основного и плакирующего слоев. При волочении труб из двухслойных материалов на короткой оправке выявлены оптимальные углы конусности волокна в пределах $10-18^\circ$, соответствующие наименьшей величине силы, при коэффициентах утонения $m_s < 0,75$. Если величины коэффициентов утонения $m_s > 0,75$, величина оптимальных углов конусности матрицы α с уменьшением коэффициента утонения m_s смещается в сторону больших углов. При волочении двухслойных труб на длинной оправке увеличение угла конусности волокна α сопровождается ростом относительной силы \bar{P} и уменьшением относительного напряжения $\bar{\sigma}_r$ на выходе из очага пластической деформации. Установлено, что с уменьшением коэффициента утонения m_s и увеличением коэффициента трения на оправке μ_o (при $\mu_a = const$) относительная величина силы \bar{P} возрастает. Показано, что учет упрочнения существенно уточняет величину силы исследуемого процесса волочения и предельный коэффициент утонения, однако не изменяет характер влияния угла конусности волокна α и условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и трубы (μ_o/μ_a).

5. Оценена величина накопленной повреждаемости, неоднородности интенсивности деформации и механических свойств материала труб по толщине стенки от технологических параметров и геометрии рабочего инструмента. Показано, что величина неоднородности интенсивности деформации δ_c и напря-

жений δ_{σ} в стенке трубы с уменьшением угла конусности волокна α и коэффициента утонения m_s падает, что говорит о более благоприятных условиях формирования механических свойств материала стенки изготавливаемой трубы.

6. Определены предельные возможности деформирования, связанные с максимальной величиной растягивающих напряжений на выходе из очага пластической деформации и накоплением повреждаемости, при волочении труб из двухслойных материалов на длинной и короткой оправках. При волочении труб из двухслойных материалов на коротких оправках выявлено существование оптимальных углов конусности волокна α в пределах $10... 18^\circ$, соответствующих наименьшей величине коэффициента утонения m_{snp} , осевого напряжения на выходе из очага пластической деформации и силы процесса. При волочении труб из двухслойных материалов на коротких оправках рост угла конусности волокна α приводит к увеличению предельного коэффициента утонения m_{snp} . Установлено, что с уменьшением коэффициента трения на оправке предельный коэффициент утонения m_{snp} увеличивается при волочении труб на длинной оправке, а при волочении труб на короткой оправке m_{snp} уменьшается. Предельные возможности формоизменения при волочении труб из двухслойных материалов ограничиваются как максимальной величиной растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации, так и степенью использования ресурса пластичности. Это зависит от схемы волочения, механических свойств основного и лакирующего материалов заготовки, технологических параметров, геометрии волокна и условий трения на контактных поверхностях инструмента.

7. Выполнены экспериментальные исследования по определению констант кривых упрочнения и разрушения двухслойной стали 12ХЗГНМФА+08Х13. Проведены экспериментальные исследования процесса волочения труб на длинной оправке из двухслойной стали 12ХЗГНМФА+08Х13 в конических волокнах. Расхождение теоретических и экспериментальных данных по силовым режимам процесса волочения труб на длинной оправке не превышает до 10 %.

8. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по расчету технологических параметров процессов волочения труб с утонением стенки из двухслойных материалов на длинных и коротких оправках, которые использованы на закрытом акционерном обществе «Завод экспериментального машиностроения ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева» в объёмном производстве при совершенствовании существующих и создании новых технологий изготовления и переработки труб из ряда двухслойных сталей. Результаты научных исследований использованы в учебном процессе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Оценка предельных возможностей формоизменения при волочении труб из двухслойных материалов / В.И. Трегубов, С.С. Яковлев, А.В. Черняев, Р.Г. Панфилов // Сборник тезисов II международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» – Тула: ТулГУ, 2004. – С. 42-44.

2. Силовые режимы волочения труб из двухслойных материалов / В.И. Трегубов, Р.Г. Панфилов, С.С. Яковлев, К.С. Ремнев // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. – 2004. – Вып. 1. – С. 58 - 68.

3. Трегубов В.И., Яковлев С.С., Панфилов Р.Г. Плоское течение двухслойного материала в клиновом канале // Тезисы докладов Международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики», посвященной 80-летию со дня рождения профессора Л.А. Голоконникова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – С. 241-243.

4. Панфилов Р.Г., Безотосный Д.А. Волочение труб из двухслойных материалов // Сборник тезисов II международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» – Тула: ТулГУ, 2004. – С. 34-36.

5. Панфилов Р.Г., Безотосный Д.А., Пантелеев С.П. Технологические параметры процесса волочения труб из двухслойных материалов // XXX Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. - М.: МАТИ, 2004. – Том 1. – С. 69-70.

6. Математическая модель пластического деформирования двухслойных анизотропных материалов в клиновом канале / С.П. Яковлев, О.В. Пилипенко, Д.А. Безотосный, Р.Г. Панфилов // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005 – Вып. 1. – С. 8 – 17.

7. Пилипенко О.В., Безотосный Д.А., Панфилов Р.Г. Анизотропия механических свойств стали 12Х3ГНМФБА плакированной сталью 08Х13 // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – 2005. – Вып. 2. – С. 81-87.

8. Панфилов Р.Г. Исследования силовых параметров процесса волочения труб из двухслойных материалов // XXXII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Тезисы докладов. - М.: МАТИ, 2006. – Том 1. – С. 223-224.

9. Панфилов Р.Г. Неоднородность механических свойств при волочении двухслойных труб на коротких оправках // Лучшие научные работы студентов и аспирантов технологического факультета – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 111-113.

10. Панфилов Р.Г., Суков М.В. Оценка повреждаемости при волочении труб из двухслойных материалов на оправках // Лучшие научные работы сту-

дентов и аспирантов технологического факультета. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006 – С 65-69.

11 Панфилов Р.Г. Об оценке предельных возможностей процесса волочения труб из двухслойных материалов // Известия ТулГУ. Машиноведение: Материалы международной научно-технической конференции «Творческое наследие профессора В.Ф. Прейса». - Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 215-217.

12 Панфилов Р.Г. Моделирование процесса волочения труб из двухслойных материалов // Известия ТулГУ. Машиноведение: Материалы международной научно-технической конференции «Творческое наследие профессора В.Ф. Прейса». - Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 231-238.

Подписано в печать 18.05.2006.

Формат бумаги 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,0 Уч.-изд. л. 1,1.

Тираж 100 экз. Заказ 120 .

Тульский государственный университет.

300600, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300600, г. Тула, ул. Болдына, 151.