

На правах рукописи

МАЛЬЦЕВ ДЕНИС НИКОЛАЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРУБОГИБОЧНОГО
ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ
СЕЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата
технических наук

Орел – 2014

Работа выполнена ФГБОУ ВПО «Государственный университет УНПК».

Научный руководитель – **Вдовин Сергей Иванович**
доктор технических наук, профессор,
профессор ФГБОУ ВПО
«Государственный университет УНПК»

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор ФГБОУ ВПО МГТУ
«СТАНКИН»;

Шпунькин Николай Фомич
кандидат технических наук,
профессор, профессор ФГБОУ ВПО
МГМУ «МАМИ»;

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Тульский
государственный университет»

Защита состоится « 10 » июня 2014 года в 14.00 час. на заседании диссертационного совета Д212.182.03, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке на сайте ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК» по адресу: <http://gu-unpk.ru>

Автореферат разослан « 24 » апреля 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Борзёнков Михаил Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Гибка трубы сопровождается искажением сечения, отрицательно влияющим на работоспособность трубопровода. Применение дорна, поддерживающего стенку трубы изнутри, усугубляет ее утонение. Придание участку прямой заготовки обратной овальности может компенсировать искажение сечения при гибке, однако применение такой технологии затруднено не изученностью деформированного состояния трубы на каждом из этапов формоизменения.

Традиционным средством преодоления подобных “белых пятен” является решение вариационной задачи в деформациях, с использованием координатных (по Ритцу) функций перемещений. Для достоверного вариационного анализа деформаций трубы требуется связать координатные функции с уравнениями статики. Также нуждается в уточнении форма переходного участка изгибаемой трубы с переменной – от нуля до обратной величины радиуса копира – кривизной оси. Длина названного участка, влияющая на утонение стенки, зависит от размеров и компоновки инструментов гибки, однако известные аналитические выражения этой зависимости не учитывают сдвиговый компонент прогиба оси трубы.

Таким образом, совершенствование трубогибочного производства предварительным деформированием сечения заготовок является актуальной темой исследования.

Работа выполнялась на кафедре «Автоматизированные процессы и оборудование бесстружковой обработки материалов» Госуниверситета – УНПК в рамках проекта «Метод вариационных оценок деформаций пластического изгиба труб» аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)”.

Степень разработанности темы: Отечественными и зарубежными исследователями (Ю.Н. Алексеев, Б.С. Билобран, Е. Reissner, М.М. Seddeik, К.А. Stelson, L.C. Zhang и др.) получены вариационные оценки овальности изогнутых труб, оказавшиеся весьма различными из-за недостаточных ограничений на выбор координатных функций. Придание овальности сечениям прямой трубы, подлежащей изгибу, в изученных публикациях не рассматривается. Опубликованное уравнение изогнутой оси трубы, нагруженной поперечной силой, учитывает только поворот сечений, игнорируя сдвиги.

Цель работы – уменьшение овальности сечения трубы, изогнутой по круглому копиру без дорна и наполнителя.

Объект исследования – процессы деформирования плитам сечения прямой трубы и последующей гибки по круглому копиру.

Предметом исследования являются размеры сечения прямой трубы, деформированной плитам, и утонение стенки изогнутой трубы.

Задачи исследования

- выполнить теоретическое исследование процесса деформирования сечения прямой трубы плитам с вогнутой рабочей поверхностью;

- разработать математическую модель изгиба трубы по круглому копиру с учетом сдвигов сечений на участке свободного деформирования;

- усовершенствовать инженерный метод вариационной оценки деформаций, обеспечив сходимость решения задачи и учет вариации работы внешних сил;

- создать упрощенные методики расчета деформирования плитам сечения прямой трубы и утонения стенки при последующей гибке по круглому копиру.

Методология и методы исследования: системный подход к решению сформулированных задач в напряжениях и в деформациях с применением вариационного метода Ритца и опытного деформирования труб на испытательной машине МР200 и экспериментальной гибочной установке с измерением деформаций по изменению сетки, нанесенной лазерным прибором МИНИМАРКЕР 2.

Научная новизна работы

- теоретическое исследование деформирования сечения прямой трубы позволило связать изменение его высоты и ширины системой уравнений, удовлетворяющих условиям равновесия;

- математическое моделирование изгиба трубы на участке свободного деформирования с применением интерполирующих полиномов прогиба трубы, вызванного поворотом и сдвигом сечений, повысило точность уравнения изогнутой оси и вариационной оценки деформаций;

- вариационная оценка деформаций с использованием выборочных условий статического равновесия обеспечила сходимость и повышенную точность решения задачи при минимальном числе варьируемых параметров;

- использование варьируемого отношения напряжений гибки трубы позволило получить упрощенную методику расчета толщины стенки.

Достоверность полученных результатов обеспечена:

- корректной постановкой задач и обоснованными допущениями;

- сходимостью решения вариационной задачи;

- согласованием результатов анализа процесса различными методами и их проверкой экспериментальными средствами.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- применении условия равенства нулю суммарного изменения угла наклона касательной к средней линии деформируемого сечения прямой трубы для преодоления статической неопределимости пластического напряженно-деформированного состояния;

- улучшении сходимости вариационной оценки пластических деформаций дополнением кинематических ограничений, накладываемых на координатные функции перемещений, выборочными условиями статического равновесия;

- учете вариации работы внешней силы для оценки деформаций пластического изгиба трубы благодаря варьированию коэффициента пропорциональности напряжений.

Практическая ценность работы состоит из:

- определения рабочего перемещения инструмента деформирования прямой трубы, обеспечивающего необходимое увеличение ширины сечения;

- установления зависимости длины переходного участка трубы при изгибе обкатыванием по круглому копиру от размеров инструмента и его компоновки, а также от показателя степенной функции упрочнения материала;

- установления зависимости утонения стенки трубы от длины переходного участка при изгибе по круглому копиру и от коэффициента цилиндрической анизотропии материала.

Положения, выносимые на защиту:

- преодоление статической неопределимости задачи свободного деформирования сечения прямой трубы из упрочняемого материала условием равенства нулю интеграла изменения кривизны стенки в пределах четверти периметра;

- применение выборочных условий равновесия для корректировки коэффициентов координатной функции радиального перемещения для вариационной оценки размеров прямой трубы, сжимаемой плитами по высоте сечения;

- применение варьируемого соотношения напряжений для оценки изменения толщины стенки трубы, изгибаемой по копиру;

- теоретически установленная знакопеременная кривизна оси трубы на участке свободного изгиба трубы по круглому копиру;

- методика инженерного расчета размеров деформированного сечения прямой трубы из жесткопластического материала с максимальным ограничением размеров очагов пластической деформации.

Реализация работы. Результаты выполненных исследований внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование» постановкой лабораторной работы.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на международных конференциях, а также на научных семинарах.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 10 трудов, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях перечня ВАК; получен 1 патент Российской Федерации на изобретение.*

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка. Текст диссертации изложен на 124 страницах машинописного текста, иллюстрирован 41 рисунком, содержит 6 таблиц. Библиографический список включает 52 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе 1 содержится аналитический обзор исследований гибки труб, констатируется отсутствие не только общепринятой инженерной теории этого процесса, но и сформировавшегося подхода к ее разработке. Математическое моделирование технологического изгиба труб эволюционирует от простейшей схемы чистого изгиба к более адекватным схемам изгиба поперечной силой; те и другие малоприспособны для практики: первые недостоверны, а последние – предназначенные для компьютерной реализации – сложны в программировании. Разрозненные обращения к проблеме овализации труб объединяет использование принципа минимума полной потенциальной энергии и слабо ограниченный кинематическими условиями выбор координатных функций, аппроксимирующих форму деформируемого сечения. В изученных публикациях не рассматривается придание трубчатым заготовкам обратной овальности, также отсутствует учет сдвигов сечений при гибке поперечной силой, позволяющий существенно уточнить форму переходного участка трубы и расчет утонения.

* Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук, доценту Т.В. Федорову и учебному мастеру Н.В. Татарченкову за оказанную помощь при выполнении работы

В разделе 2 представлена математическая модель деформирования сечения прямой трубы, сжимаемого по высоте инструментами в виде плит с вогнутой рабочей поверхностью. Задача решается на основе равновесия внешних и внутренних сил и относится к разряду статически неопределимых, для получения разрешающих уравнений потребовалось связать внутренний момент M с изменением кривизны стенки трубы $\Delta\xi$ и наложить на эту величину корректное кинематическое ограничение.

Деформируемый материал принят жесткопластическим, упрочняющимся по степенному закону $\sigma_s = A\varepsilon_1^n$. Относительное удлинение оси трубы и ее продольного волокна принимается равным нулю, формоизменение всех поперечных сечений, схематично представленное на рисунке 1, одинаково.

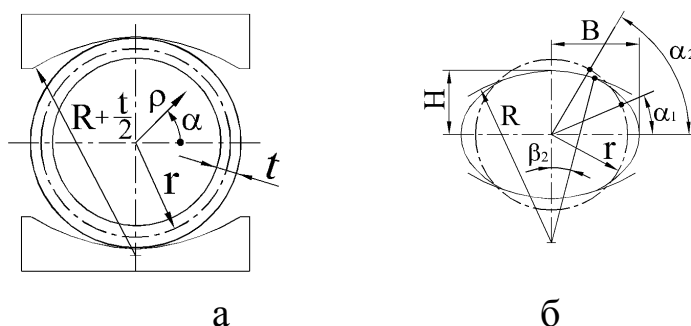


Рисунок 1 – Исходное сечение трубы (а) и его средняя линия после деформирования плитами с вогнутой поверхностью (б)

Диапазонам $0 \leq \alpha < \alpha_1$ и $\alpha_1 < \alpha \leq \pi/2$ соответствуют дуги исходной линии, получившие в результате данной операции положительное и отрицательное приращение кривизны $\Delta\xi$. В пределах $\alpha_2 \leq \alpha \leq \pi/2$ $\Delta\xi = 1/R - 1/r$; граница конечного положения этой дуги обозначена угловым размером β_2 , к ней приложена внешняя сила P .

При $0 < \alpha < \alpha_2$ величина $\Delta\xi$ связана с погонным моментом формулой

$$M = \frac{\pm At^{n+2}}{\sqrt{3}(n+2)} \left(\frac{|\Delta\xi|}{\sqrt{3}} \right)^n. \text{ Учитывая, что } M = 0 \text{ при } \alpha = \alpha_1 \text{ и обозначая}$$

$$M_2 = M|_{\alpha=\alpha_2}, \text{ имеем: } P = \frac{M_2}{r(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}, \quad M = M_2 + rP(\cos \alpha - \cos \alpha_2). \text{ То, что}$$

условия статики деформированного сечения заданы на его исходной форме – вынужденная мера, вносящая погрешность (занижение плеча силы P).

Из приведенных выражений M и P следует:

$$\Delta\xi = \text{sign}(\alpha_1 - \alpha) \sqrt{3} \left[|M_2 + rP(\cos \alpha - \cos \alpha_2)| \frac{\sqrt{3}(n+2)}{At^{n+2}} \right]^m, \text{ где } m = 1/n.$$

Неизвестная координата α_1 определяется из уравнения

$$\int_0^{\pi/2} [r\Delta\xi - y_c\Delta\xi(1 + r\Delta\xi)]d\alpha = 0,$$

отражающего равенство нулю суммарного изменения угла касательной к средней линии сечения. Смещение y_c нейтральной линии, вызываемое силой P , приблизительно равно $\pm t^2 \cos\alpha / [4r(1 - \cos\alpha_2)]$ и имеет тот же знак, что и $\Delta\xi$.

Задавая значением α_2 размер участка сечения, прилегающего к инструменту, решаем данное уравнение в программе MathCAD относительно неизвестной α_1 методом подбора. В развернутой записи уравнения диапазон интегрирования разделен на три части значениями α_1 и α_2 , для каждой из которых применяется соответствующая формула $\Delta\xi$.

$$\text{Размеры } H = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{1}{r} + \Delta\xi\right)^{-1} \sin \beta d\beta \quad \text{и} \quad B = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{1}{r} + \Delta\xi\right)^{-1} \cos \beta d\beta$$

также подсчитываются с применением различных формул $\Delta\xi$. Приращения размеров: отрицательное $\Delta H = H - r$ и положительное $\Delta B = B - r$ зависят от заданного угла α_2 , относительной толщины стенки трубы t/r и показателя n функции упрочнения материала, рисунок 2.

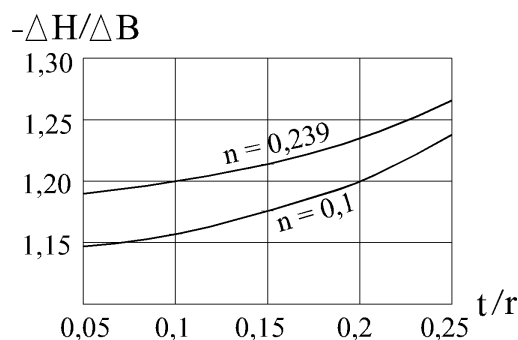


Рисунок 2 – Изменение размеров сечения трубы при $R/r = 2, \alpha_2 = 1,1$

Увеличению отношения $-\Delta H/\Delta B$ способствует сжатие периметра средней линии – как показывает расчет и подтверждает практика – минимальное у тонкостенных труб. Слабо упрочняющемуся материалу, нержавеющей стали ($n = 0,239$) соответствуют большие отношения $-\Delta H/\Delta B$, чем сплавам на основе титана ($n = 0,1$).

В третьем разделе описан альтернативный подход к определению размеров H и B деформированного сечения трубы. Он заключается в априорном задании кинематически допустимых функций перемещений и варьировании значений их параметров v_i на основе минимума полной потенциальной энергии системы. В теории обработки металлов давлением принят упрощенный метод вариационной оценки деформаций, согласно

ему разрешающие уравнения $\frac{\tau_s}{2\Gamma_c} \int_F \frac{\partial \Gamma^2}{\partial v_i} dF + \frac{\partial W}{\partial v_i} = 0$ содержат:

τ_s – касательное напряжение текучести жесткопластического материала;

Γ и Γ_c – интенсивность деформаций сдвига и ее среднее значение;
 W – погонную величину работы внешних сил; F – площадь сечения трубы.

Предлагаемая функция радиального перемещения точек средней линии сечения $u_r = v_1 r f_1(\alpha) + v_b r f_b(\alpha)$ содержит варьируемый v_1 и заданный v_b параметры, а также функции $f_b(\alpha) = \cos^2 \alpha$ и $f_1(\alpha) = \sum_{i=1}^4 s_i \cdot \sin^{2i} \alpha$. Коэффициенты s_j , в сумме равные единице, призваны обеспечить выполнение статических ограничений, их значения определяются подбором.

Изменение кривизны средней линии сечения трубы $\Delta\xi = \frac{-1}{r^2} \left(\frac{d^2 u_r}{d\alpha^2} + u_r \right)$ симметрично относительно границ квадрантов, где $u_r' = 0$, $u_r''' = 0$. Равенство нулю перемещения по периметру сечения при $\alpha = \pm\pi/2$ обеспечивает функция

$u_\alpha = \rho(\rho - r) \int (\Delta\xi + \Delta^*) d\alpha + v_2 r f_2(\alpha)$ с варьируемым параметром v_2 при $f_2(\alpha) = \sin \alpha \cos \alpha$ и компонентом $\Delta^* = \frac{1}{r} \left[\frac{v_b}{2} + v_1 \left(\frac{s_1}{2} + \frac{3}{8} s_2 + \frac{5}{16} s_3 + \frac{35}{128} s_4 \right) \right]$. Последний компенсирует отличие от нуля при $\alpha = \pm\pi/2$ интеграла $\int u_r d\alpha$, содержащегося в функции u_α .

Интегрирование условия постоянства объема вида $\frac{du_\rho}{d\rho} + \frac{u_\rho}{\rho} = -\frac{du_\alpha}{\rho d\alpha}$ при $\varepsilon_z = 0$ с граничным условием $u_\rho|_{\rho=r} = u_r$ определяет радиальное перемещение и – вместе с функцией u_α – деформации, содержащиеся в выражении Γ .

Работа внешних сил $W = 4P|\Delta H|$, путь $|\Delta H|$ силы P , приложенной к $1/4$ сечения трубы единичной длины, равен $-v_1 r$. Обозначая моменты $M_0 = M|_{\alpha=0}$, $M_{90} = M|_{\alpha=\pi/2}$ и приравнивая каждый $\tau_s t^2/2$, выражаем $P = \tau_s t^2 / [r(1 + v_b)]$.

Для придания компактности разрешающим уравнениям предлагается эффективный подход, получивший название объектно-ориентированного. Объединяя слагаемые Γ^2 согласно принятым классам объектов, получаем $\int_F \Gamma^2 dF = 4(K_1 v_1 + K_2 v_2 + K_{11} v_1^2 + K_{12} v_1 v_2 + K_{22} v_2^2 + K_0)$ с численными значениями K_0 и коэффициентов при неизвестных. Дифференцируем данное

выражение по v_1 и v_2 и находим их значения из разрешающей системы уравнений.

Коэффициенты s_j функции перемещения u_r , первоначально заданные произвольно, подлежат корректировке по результатам проверки выборочных условий равновесия, например: $(M_\alpha - M_{90})/[(M_0 - M_{90})\cos\alpha] \approx 1$. Выражения

$$M_\alpha = \int_{r-\frac{t}{2}}^{r+\frac{t}{2}} \sigma_\alpha(\rho, \alpha)(\rho - r)d\rho, \text{ а также } \sigma_\alpha(\rho, \alpha) = \frac{2\tau_s \varepsilon_\alpha(\rho, \alpha)}{\sqrt{\varepsilon_\alpha(\rho, \alpha)^2 + \frac{1}{4}\gamma(\rho, \alpha)^2}} \text{ подлежат}$$

вводу в программу MathCAD как пользовательские функции. Проверка приведенного выше условия статики выполнялась при $\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$. Примеры окончательных результатов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Выходные данные решения задачи в зависимости от относительной толщины стенки трубы t/r

t/r	$s_1; s_2; s_3; s_4$	$-\Delta H/\Delta B$	$M_0; M_{45}; M_{60}; M_{90}$	K_{45}	K_{60}
0,05	1; 0,3; 0,2; 0	1,114	0,044; 0,005; -0,019; -0,078	0,969	0,962
0,1	1; 0,4; 0,5; 0	1,190	0,256; 0,072; -0,066; -0,399	1,016	1,016
0,2	1; 0; 0; 0,5	1,225	1,843; 0,771; -0,0006; -1,851	1,004	1,002

Отношения $-\Delta H/\Delta B$ во второй и третьей строках, будучи перенесены на рисунок 2, практически совпадают с графиком для слабо упрочняющегося материала. Значение $-\Delta H/\Delta B$, равное 1,114, оказывается существенно ниже графика. По-видимому, выбранная конструкция функции перемещения u_r недостаточно адекватна при малой относительной толщине стенки трубы t/r .

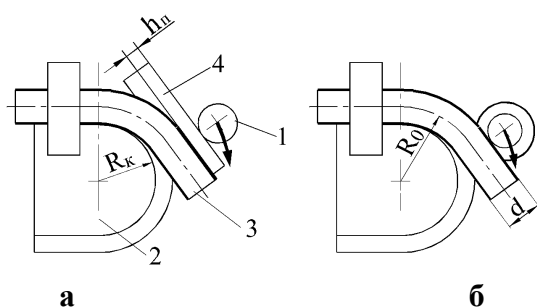


Рисунок 3 – Примеры наладки инструментов гибки

В четвертом разделе разработана математическая модель гибки трубы 3 обкатывающим роликом 1 по копиру 2 (рисунок 3) и получена вариационная оценка изменения толщины стенки.

Установившаяся стадия процесса характеризуется непрерывным увеличением протяженности участка заготовки,

изогнутого на окончательный радиус R_0 , и наличием зоны свободного (без контакта с инструментом) изгиба, которая перемещается по заготовке вслед за обкатывающим роликом и имеет стабильную длину. В названной зоне располагается переходный участок заготовки с изменяющимся от ∞ до R_0 радиусом оси, рисунок 4.

Точками 0, 1 обозначены границы зоны свободного изгиба; длина интервала 0–1, приблизительно равная аппликате z_1 точки 1, находится в прямой зависимости от зазора c между

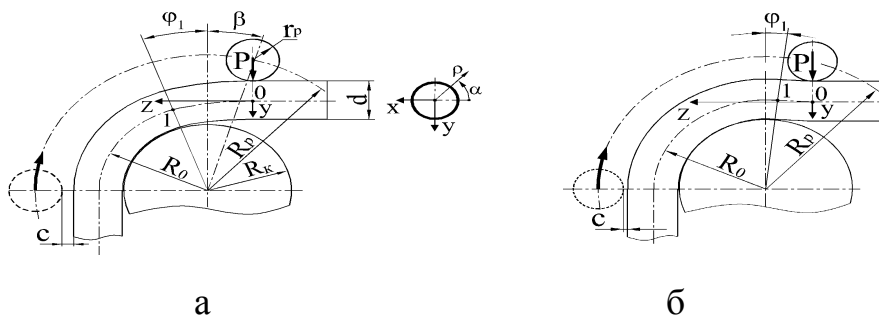


Рисунок 4 – Схема без учета (а) и с учетом (б) сдвигов поперечных сечений

заготовкой и роликом в его исходном положении. При достаточно большом зазоре c – порядка $0,2d$ отношение $z_1/d > 2$, что оправдывает пренебрежение сдвигами сечений.

Размеры на схеме и координаты точки 1: y_1, z_1 связаны уравнениями

$$R_p \cos \beta = R_0 \cos \varphi_1 + y_1 + 0,5d + r_p + (h_{\text{п}}); \quad R_p \sin \beta = z_1 - R_0 \sin \varphi_1;$$

$$R_p = R_0 + c + 0,5d + r_p + (h_{\text{п}}); \quad h_{\text{п}} - \text{размер планки 4 на рисунке 3.}$$

Для жесткопластического материала и функции упрочнения

$$\sigma_s = A \varepsilon_1^n \text{ имеем формулы: } \varphi_1 = \frac{z_1}{R_0(m+1)}, \quad y_1 = \frac{z_1^2}{R_0(m+1)(m+2)}, \quad m = 1/n.$$

Подставляя в уравнения выражения φ_1 и y_1 , находим значения неизвестных β и z_1 .

Утонение стенки трубы максимально при $z_1/d \rightarrow 0$, когда в зоне свободного изгиба перемещение u_α затруднено соседними участками заготовки, деформированное состояние близко к плоскому: $\varepsilon_\alpha \rightarrow 0, \sigma_\alpha \approx \sigma_z/2$.

Вводим варьируемый параметр ν_1 в соотношение напряжений: $\sigma_\alpha = \nu_1 \sigma_z$.

Из условия пластичности при $\sigma_r = 0$ и пренебрежимо малых касательных напряжениях получаем $\sigma_z = \pm \sqrt{3} \tau_s / \sqrt{1 - \nu_1 + \nu_1^2}$. Для не упрочняемого материала вариация работы внешнего момента в зоне свободного изгиба

$$\frac{\partial W}{\partial v_1} = \varphi_1 \frac{\partial \sigma_z}{\partial v_1} \int_F \rho \sin \alpha dF.$$

Из уравнений связи напряжений и деформаций следует:

$$\varepsilon_\rho = -\varepsilon_z \frac{1+v_1}{2-v_1}, \quad \varepsilon_\alpha = -\varepsilon_z \frac{1-2v_1}{2-v_1}. \quad \text{Принимаем } \varepsilon_z = \frac{\rho \sin \alpha}{R} \text{ и получаем формулы}$$

перемещений u_ρ, u_α, u_z , а также деформаций сдвига.

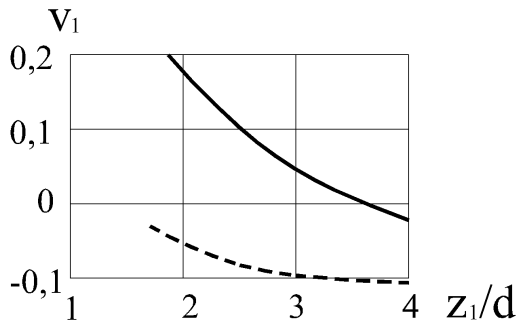


Рисунок 5 – Влияние относительной длины переходного участка: материалы труб – сплавы ВТ1-2 и АМг6М (пунктир).

Значение варьируемого параметра v_1 находим из уравнения

$$\int_0^{z_1} \int_0^{2\pi} \int_{r-\frac{t}{2}}^{r+\frac{t}{2}} \frac{\partial \Gamma^2}{\partial v_1} \rho d\rho d\alpha dz + \frac{2\Gamma_c}{\tau_s} \frac{\partial W}{\partial v_1} = 0,$$

результаты иллюстрирует рисунок 5.

Приближенную оценку относительного удлинения ε_0 оси изогнутого участка заготовки получаем из условия $\int_F \sigma_z dF = 0$, в котором

площадь сечения ограничена окружностями радиуса $r_1 = r + 0,5t_0$ и $r_2 = r - 0,5t_0$ с эксцентриситетом

$$c = 2 \frac{t_0 r}{R_0} \cdot \frac{1+v_1}{2-v_1}. \quad \text{При одноосном}$$

напряженном состоянии жесткопластического материала ($\sigma_z = \pm \sqrt{3}\tau_s$) расстояние нейтральной линии от центра радиуса наружной границы сечения приблизительно равно r^2/R_0 и

$$\frac{\Delta t_{\min, \max}}{t_0} = \mp \frac{r}{R_0} \cdot \frac{1+v_1}{2-v_1} - \frac{r^2}{2R_0^2}.$$

Графики на рисунке 6 иллюстрируют рассчитанное согласно данной формуле изменение толщины стенки

трубы из стали 20 ($n = 0,161$) при относительной толщине стенки $t_0/d = 0,05$.

Уточняем форму изогнутой оси переходного участка с учетом зависимости момента внутренних сил от касательного напряжения – τ_{yz} .

Внешней силе P и создаваемому ей моменту соответствуют выражения $P = \int_F \tau_{yz} dF$ и $Pz = - \int_F \sigma_z y dF$. Задаем три значения радиуса оси в точках переходного участка: $R_1 = R_0$, $R_2 = 3R_0$, $R_3 = 15R_0$, а также внешнюю силу – относительной величиной $\bar{P} = P/(\tau_{02}F)$.

Находим деформации γ_{yz} из интегрального выражения силы P и уравнений связи для каждого из заданных радиусов R_1, R_2, R_3 . По найденным значениям γ_{yz} и формуле $M = Pz$ с подстановкой выражения напряжения σ_z в деформациях подсчитываем моменты M_i ($i = 1, 2, 3$) в рассматриваемых сечениях и аппликаты точек $z_i = M_i/P$, $i = 1, 2, 3$. Выражаем изгибный и сдвиговой компоненты прогиба оси полиномами $\bar{y}_n = a_1 \bar{z}^3 + a_2 \bar{z}^4 + a_3 \bar{z}^5$ и $\bar{y}_c = b_1 \bar{z} + b_2 \bar{z}^3 + b_3 \bar{z}^4 + b_4 \bar{z}^5$, где $\bar{y}_n = y_n / z_1$; $\bar{y}_c = y_c / z_1$; $\bar{z} = z / z_1$.

Принимая $1/R = y_n''$, определяем коэффициенты полинома \bar{y}_n из системы трех выражений его второй производной, отличающихся значениями \bar{z} . Аналогично находим коэффициенты полинома \bar{y}_c , приравнявая выражения его первой производной подсчитанным ранее значениям деформации γ_{yz} .

Суммирование вторых производных полиномов \bar{y}_n и \bar{y}_c показывает наличие участка оси с отрицательной кривизной, примыкающего к началу координат на рисунке 4. Наличие точки перегиба оси трубы не означает изменение знака деформации ε_z , которая зависит не от суммарной кривизны оси, а от одного из ее компонентов, равного \bar{y}_n'' . Другой компонент – \bar{y}_c'' , вызываемый сдвигом сечений, не влияет на длину материального волокна трубы.

В пятом разделе разработаны инженерные расчеты деформаций трубы на основе изложенных выше исследований. Предлагаемый технологический процесс предусматривает двухэтапное деформирование трубной заготовки с приданием ее сечениям овальности, компенсирующей последующее изменение формы при изгибе по копиру.

Упрощенный расчет размеров $1/4$ сечения трубы из

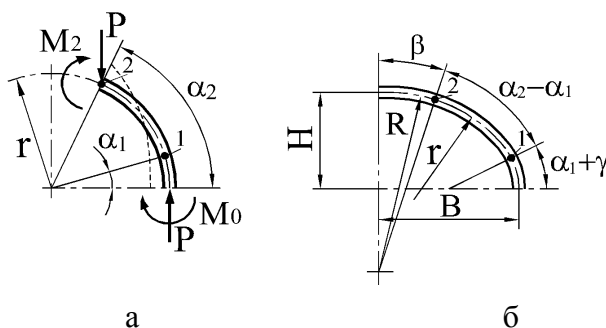


Рисунок 7 – Расчетная схема и эпюра изгибающего момента (пунктир)

жесткопластического не упрочняемого материала при деформировании вогнутыми плитами основан на неизменности кривизны значительной части стенки, рисунок 7.

Участок стенки с размерами R и β приобрел форму инструмента, соседний жесткий участок сохранил исходный радиус и длину $r(\alpha_2 - \alpha_1)$. К месту их стыковки приложена внешняя сила, здесь образуется пластический шарнир.

На участке свободного изгиба с угловым размером α_1 и переменным изменением кривизны средней линии $\Delta\xi$ сила P вызывает смещение $c \approx t_0^2 / (4r)$ нейтральной поверхности деформаций и равна $2c\sigma_s \cos\alpha$. Соответствующее увеличение толщины стенки $\Delta t = ct_0 \Delta\xi$.

$$\text{Исходя из } M \approx \frac{\sigma_s (t_0 + \Delta t)^2}{2\sqrt{3}} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{3}P}{2\sigma_s t_0} \right)^2 \right], \quad \frac{dM}{d\Delta\xi} = \frac{\sigma_s t c t_0}{\sqrt{3}} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{3}P}{2\sigma_s t_0} \right)^2 \right].$$

Поскольку $M = M_0 - rP(1 - \cos\alpha)$ и $\frac{dM}{d\alpha} = -rP \sin\alpha$, получаем

$$\text{уравнение } \frac{d\Delta\xi}{d\alpha} \cdot \frac{\sigma_s (t_0 + ct_0 \Delta\xi) ct_0}{\sqrt{3}} = -rP \sin\alpha, \quad \text{откуда}$$

$$\Delta\xi \approx \Delta\xi_0 + \frac{4r}{t_0^2} (\cos\alpha - 1).$$

На границе пластического и жесткого участков $\Delta\xi = 0$, следовательно,

$$\alpha_1 = \arccos \left(1 - \frac{\Delta\xi_0 t_0^2}{4r} \right).$$

Угол γ поворота жесткого участка стенки трубы определяется из

$$\text{уравнения } \Delta\xi \approx -\frac{d^2 u_r}{r^2 d\alpha} \text{ как } \left. \frac{-du_r}{rd\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_1} = r\Delta\xi_0 \alpha_1 - \frac{4r^2}{t_0^2} (\alpha_1 - \sin\alpha_1).$$

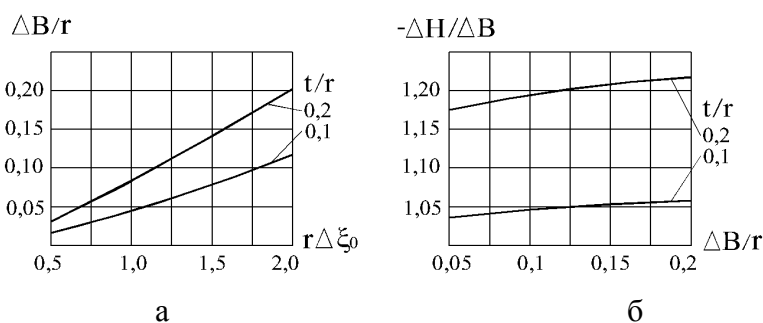


Рисунок 8 – Связь параметров деформируемого сечения трубы

По заданному $\Delta\xi_0$ – приращению кривизны средней линии при $\alpha = 0$ и найденному γ подсчитываем

$$\beta = \gamma \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \quad \text{и}$$

$x_2 = R \sin\beta$. Зная углы α_1 и $\alpha_2 = 0,5\pi - \beta - \gamma$,

находим длину l и угол φ отрезка прямой, соединяющего крайние точки 1 и 2 дуги $r(\alpha_2 - \alpha_1)$. Абсцисса точки 1: $x_1 = x_2 + l \sin(\varphi + \gamma)$; размер B на рисунке 7 принимаем равным $x_1 + r_1[1 - \cos(\alpha_1 + \gamma)]$. Условно принятый радиус средней линии на участке свободного изгиба $r_1 = r\alpha_1/(\alpha_1 + \gamma)$.

Так же элементарно подсчитывается другой размер на рисунке 7
 $H = r_1 \sin(\alpha_1 + \gamma) + l \cos(\varphi + \gamma) + R(1 - \cos \beta)$.

Результаты расчета размеров B и H иллюстрируют графики на рисунке 8.

Графическое представление соотношений $\Delta H/\Delta B$ на рисунке 8, б отличается от вариационной оценки в начале деформирования на 10...15%, а затем отличие уменьшается. Данные экспериментального деформирования труб из стали 20 с размерами: $d = 30$ мм, $t = 3$ мм также близки к результатам расчетов.

Для расчета утонения стенки трубы, изогнутой по схеме на рисунке 4, применяем метод вариационной оценки деформаций, разработанный в предыдущем разделе. Анизотропия материала учитывается

коэффициентом $\mu = \frac{\varepsilon_\alpha}{\varepsilon_\rho} / \left(\frac{\varepsilon_\alpha}{\varepsilon_\rho} + 1 \right)$. Здесь ε_ρ и ε_α означают деформации по

толщине и ширине образца, вырезанного из трубы вдоль ее оси, при растяжении. Из уравнений связи напряжений и деформаций с учетом $\sigma_\alpha = \nu_1 \sigma_z$, а также условия не сжимаемости материала и формулы $\varepsilon_z = \rho \sin \alpha / R$ имеем: $\varepsilon_\rho = \frac{-\rho \sin \alpha}{R} \cdot \frac{(1 + \nu_1)(1 - \mu)}{1 - \nu_1 \mu}$; $\varepsilon_\alpha = \frac{-\rho \sin \alpha}{R} \cdot \frac{\mu - \nu_1}{1 - \nu_1 \mu}$.

Интегрируя эти формулы, выражаем перемещения u_z , u_ρ , u_α , а затем деформации $\gamma_{\rho\alpha}$, $\gamma_{\alpha z}$, $\gamma_{z\rho}$. Принимаем координату ρ равной ее среднему значению r . Соответственно изменяется вариационное уравнение:

$$\int_0^{z_1} \int_0^{2\pi} r t \frac{\partial \Gamma^2}{\partial v_1} d\alpha dz + \frac{2\Gamma_c}{\tau_s} \frac{\partial W}{\partial v_1} = 0,$$

где $\Gamma^2 = 4 \left[\varepsilon_\alpha^2 + 2\mu \varepsilon_\alpha \varepsilon_z + \varepsilon_z^2 + \frac{1-\mu}{2} (\gamma_{\rho\alpha}^2 + \gamma_{\alpha z}^2 + \gamma_{z\rho}^2) \right]$.

Рассчитываемое отношение деформаций: $\frac{\varepsilon_\rho}{\varepsilon_z} = \frac{-(1 + \nu_1)(1 - \mu)}{1 - \nu_1 \mu}$

находится в сильной зависимости от показателя анизотропии μ , рисунок 9.

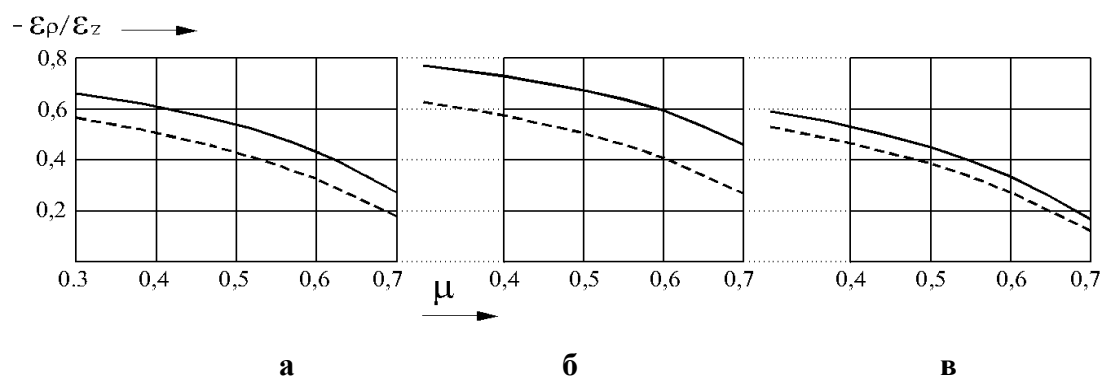


Рисунок 9 – Соотношение деформаций изгиба труб из стали 20 (а), сплава ВТ1-1 (б), стали 12Х18Н9Т (в) при $z_1/r = 4$ и 8 (пунктир)

Экспериментальная гибка труб из сплава Д16М с размерами $d = 30$ мм, $t = 1,8$ мм выполнялась на лабораторной установке с ручным приводом.

Радиус обвода копира 105 мм ограничивает радиус изогнутой оси трубы величиной $R_0/d \approx 4$. Изогнутый участок заготовки предварительно сжимали по высоте сечения вогнутым инструментом; степень сжатия варьировали в диапазоне 10... 20%. Увеличение ширины сечения достигало 13,5%. После гибки значения размеров сечения приближались к исходным, в итоге показатель овализации сечения уменьшился примерно в два раза. Фактические и рассчитанные значения толщины стенки трубы отличались на 8%, а показатель овальности сечения, деформированного до гибки, на 20%.

Разработана и защищена патентом Российской Федерации конструкция устройства для гибки труб обкатыванием по копиру с приложением к сечению изгибаемого участка сил сжатия по ширине для уменьшения его искажения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение **задачи**, имеющей существенное значение для теории и практики гибки труб – компенсирование искажения сечений заготовок при гибке путем предварительного придания им обратной овальности для получения трубопроводов, отвечающих жестким ограничениям искажения проходного сечения и утонения стенки.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены **следующие основные результаты и сделаны выводы:**

1. Сформулирована задача свободного деформирования сечения прямой трубы из упрочняемого материала, частично принимающего форму инструмента – плит с вогнутой рабочей поверхностью, дано ее

решение в напряжениях, устанавливающее зависимость увеличения ширины сечения ΔB от уменьшения высоты ΔH . Параметры напряженного состояния стенки трубы связывали с изменением ее кривизны, статическая неопределенность преодолевалась условием нулевого суммарного изменения производной прогиба средней линии сечения.

2. Вариационная оценка соотношения размеров B и H сечения прямой трубы в начальной стадии деформирования плитами подтверждает достоверность результатов решения данной задачи в напряжениях и отличается от традиционного инженерного подхода к аппроксимации функций перемещений, дополнением кинематических ограничений выборочными статическими, что обеспечило сходимость решения, несмотря на малое число варьируемых параметров, равное двум.

3. Получена вариационная оценка изменения толщины стенки трубы из жесткопластического материала, изгибаемой по копиру при неизменной круглой форме сечения, с приравненным нулю радиальным напряжением σ_r ; в качестве варьируемого параметра принят коэффициент пропорциональности напряжений σ_α и σ_z , что отличает данный подход от других приложений вариационного метода к расчетам пластических деформаций и позволяет адекватно учесть вариацию работы внешних сил.

4. Рассчитанное изменение толщины стенки изгибаемой трубы зависит от установки обкатывающего ролика, определяющей длину участка свободного изгиба z_1 , и показателя степенной функции упрочнения материала n : увеличение z_1 от двух диаметров трубы до четырех сопровождается уменьшением разнотолщинности стенки до полутора раз для слабо упрочняющихся материалов ($n > 0,2$) и до двух раз для труб из сплава титана ($n = 0,1$); последние в наибольшей степени подвержены утонению стенки, тогда как трубы из нержавеющей стали 12Х18Н9Т и сплавов алюминия – в наименьшей.

5. Выполнено моделирование участка свободного изгиба заготовки при обкатывании по круглому копиру: прогибы оси, вызванные поворотом и сдвигом сечений, описываются различными полиномами, коэффициенты которых определяются из условий статического равновесия, справедливых для точек оси с окончательным значением радиуса и произвольно заданными – промежуточными. Названные прогибы и их производные связаны с размерами гибочного инструмента системой геометрических уравнений, из которой определяется параметр установки обкатывающего ролика.

6. Учет сдвига сечений на участке свободного изгиба позволил установить следующие факты:

- кривизна оси трубы изменяет знак на некотором расстоянии от обкатывающего ролика, возрастающем с уменьшением плеча внешней силы, вызывающей изгиб;

- переходный участок с переменным радиусом оси R имеет локальный контакт с копиром, после которого значения R продолжают уменьшаться, а сдвиги сечений изменяют направление.

7. На основе выполненного математического моделирования и полученных решений вариационных задач разработаны методики инженерных расчетов предварительного деформирования прямой трубы и последующей гибки по копиру. Рассчитанное изменение толщины стенки в большой степени зависит от коэффициента μ цилиндрической анизотропии материала труб: с увеличением μ от 0,3 до 0,7 отношения $\varepsilon_r/\varepsilon_z$ уменьшаются примерно в три раза и для слабо упрочняющихся материалов приближаются к 0,2 при длине участка свободного изгиба порядка двух диаметров трубы.

8. Разработанные методики расчета размеров сечения трубы и толщины стенки прошли опытную проверку на трубах из дюралюминия, изгибаемых на лабораторной установке с предварительным приданием овальной формы инструментом с вогнутой рабочей поверхностью. Размеры сечения трубы, предварительно обжатого по высоте, отличаются от рассчитанных ввиду уменьшения периметра средней линии, не учитываемого методикой расчета; отличие показателя овальности при большой степени деформирования достигает 20%. Придание прямой трубе обратной овальности позволило почти вдвое уменьшить итоговую некруглость сечения после изгиба.

Отклонение действительной минимальной толщины изогнутой трубы от рассчитанного значения, не превышающее 8%, объясняется проведением расчета без учета овализации сечения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИМССЕРТАЦИИ:

1 Мальцев, Д.Н. Поперечный изгиб стенки трубы / С. И. Вдовин, Д. Н. Мальцев, Н. В. Татарченков // XIII Международная конференция «Информационно-вычислительные технологии и их приложения», Пенза. – 2010. – декабрь. – С. 52-54.

2 Мальцев, Д.Н. Пластический изгиб трубы овального сечения / С. И. Вдовин, Д. Н. Мальцев // IV Международная научно-практическая конференция «Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM», Пенза. – 2010. – апрель. – С. 3-6.

3 Мальцев, Д.Н. Моделирование пластического изгиба трубы с деформируемым сечением / В. Н. Михайлов, Д. Н. Мальцев // IV Международная научно-практическая конференция «Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM», Пенза. – 2010. – апрель. – С. 60-63.

4 Мальцев, Д.Н. Исследование влияния смещения дорна на процесс овализации при гибке трубы наматыванием / Т. В. Федоров, Д. Н. Мальцев // IV Международная научно-практическая конференция «Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM», Пенза. – 2010. – апрель. – С. 95-98.

5 Мальцев, Д.Н. Изгиб трубы с поперечным сжатием / Д. Н. Мальцев // «Машиностроение и безопасность жизнедеятельности», Москва. – 2010. – выпуск № 7. – С. 126-129.

6 Мальцев, Д.Н. Оценка параметров овальности трубы при деформировании ее плитами / С. И. Вдовин, Д. Н. Мальцев, Н. В. Татарченков // «Кузнечно – штамповочное производство. Обработка материалов давлением». – 2012. – № 2. – С. 13-16.

7 Мальцев, Д.Н. Пластический изгиб трубы с деформируемым сечением / С. И. Вдовин, В. Н. Михайлов, С. А. Москвитин, Д. Н. Мальцев // «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2010. – № 1. – С. 35 -38.

8 Мальцев, Д.Н. Деформирование круглого сечения прямой трубы / Д. Н. Мальцев // «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2013. – № 4. – С. 44-47.

9 Мальцев, Д.Н. Утонение стенки трубы при гибке по копиру / С. И. Вдовин, К. С. Лунин, Д. Н. Мальцев // «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2013. – №3. – С. 57-61.

10 Пат. 2406584 Российская Федерация, МПК⁷ В21D7/02
Устройство для гибки труб / С. И. Вдовин, Д. Н. Мальцев; заявитель и
патентообладатель Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования "Орловский государственный
технический университет" (ОрелГТУ). - №2009103523; заявл. 03.02.09;
опубл. 20.12.2010, Бюл. № 35. – 3с.

Подписано в печать 04.04.2014 г. Формат бумаги 60×84 1/16
Усл. печ. л. 1.0 Тираж 100 экз. Заказ №
Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет–УНПК»
302020, г Орел, Наугорское шоссе, 29