

На правах рукописи

ДОЛГОПОЛОВ МИХАИЛ ИГОРЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГИБКИ ТОНКОСТЕННЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЗКОЗОНАЛЬНОГО
ИНДУКЦИОННОГО ГРАДИЕНТНОГО НАГРЕВА**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре технологий обработки давлением ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Евсюков Сергей Александрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Вдовин Сергей Иванович
доктор технических наук, профессор

Шпунькин Николай Фомич
кандидат технических наук, профессор кафедры
обработки материалов давлением и аддитивных
технологий ФГБОУ ВО «Московский политехнический
университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита состоится « » 2019 г. в часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.04 при ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана по
адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.04
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. При изготовлении трубопроводов жидкостных ракетных двигателей ракетно-космической техники (ЖРД РКТ) широкое применение находят специальные малопластичные сплавы, не допускающие деформирование в холодном состоянии (такие как ВНС16, ВНС25, 07Х16Н6). Высокие требования к качеству, а также применение тонкостенных труб для снижения массы, вынуждают использовать гибку с узкозональным индукционным нагревом.

Наиболее существенным дефектом, возникающим при гибке труб с узкозональным индукционным нагревом, является уменьшение толщины (утонение) стенки на наружной стороне гиба. Утонение стенки негативно влияет на способность трубопровода выдерживать внутреннее давление и снижает общую прочность трубопровода, что значительно ухудшает качество получаемых изделий.

Одним из наиболее перспективных способов для уменьшения утонения при гибке тонкостенных труб является применение градиентного нагрева. Сущность данного способа заключается в уменьшении температуры внешней стороны гиба (зоны растяжения) и увеличении температуры внутренней стороны гиба (зоны сжатия), что приводит к смещению нейтральной линии деформаций в сторону зоны растяжения и, как следствие, уменьшению деформаций утонения стенки трубы.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных гибке труб с узкозональным индукционным нагревом таких авторов как В.А. Никитин, И.Н. Альбов, А.И. Гальперин, А.В. Попов, М.Н. Горбунов, G.J. Collie, I. Black, E. Muthmann, Z. Wang, Z. Hu, J.Q. Li, Gyeong-Hui Ryu, Zhe-Zhu Xu, вопросам применения градиентного нагрева при гибке уделяется мало внимания. Недостаточны как теоретические исследования зависимости величины утонения от вида и степени градиентного нагрева, так и рекомендации по его практическому применению. Недостаточны также теоретические исследования образования утонения и при гибке с индукционным нагревом при постоянной температуре нагрева.

Таким образом, исследование теоретических основ гибки с градиентным нагревом и создание устройств на основании разработанного научно-обоснованного технологичного решения **является актуальной задачей**.

Цель работы. Уменьшение утонения стенки при гибке тонкостенных труб с узкозональным нагревом за счет применения градиентного нагрева.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ современного состояния технологии гибки труб с узкозональным индукционным нагревом;
- разработать обобщенную математическую модель образования утонения тонкостенных труб при гибке с градиентным нагревом и определить общие закономерности деформации стенки, в зависимости от параметров техпроцесса;

- разработать конечно-элементную модель процесса гибки тонкостенных труб с градиентным нагревом, позволяющую определять утонение в зависимости от конкретных параметров техпроцесса и геометрических параметров трубы;

- провести экспериментальную проверку разработанных моделей при гибке с постоянной температурой нагрева и при гибке с градиентным нагревом;

- разработать методику автоматизированного контроля градиентного нагрева при гибке тонкостенных труб, а также конструктивную схему и алгоритм работы устройства, реализующего разработанную методику.

Область исследований (по паспорту специальности). Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки.

Объектом исследования является процесс гибки тонкостенных труб с узкозональным индукционным нагревом.

Предметом исследования является зависимость величины утонения стенки тонкостенных труб при гибке с узкозональным индукционным градиентным нагревом в зависимости от вида и степени градиентного нагрева.

Методы исследования. Теоретические исследования процесса формоизменения сечения трубы при гибке с узкозональным индукционным нагревом проводились с помощью «инженерного» метода с учетом принятия обоснованных допущений. Численные расчеты проводились в программе MathCad 15.0. Разработка компьютерной модели процесса гибки с градиентным нагревом проводилась в среде Ansys Workbench 14.5. Экспериментальные исследования проводились на специальном трубогибочном станке модели СГИН-120, спроектированном под руководством соискателя на ФГУП «НПО «Техномаш» в рамках ОКР «Прогресс» (СО). В качестве материала для исследований использовались трубы Ø36x2 мм из стали 12Х18Н9Т и стали ВНС16. Температура нагрева контролировалась бесконтактным пирометром Optis CT ratio 1M. Утонение труб контролировалось с помощью ультразвукового толщинометра АКС А1209.

Достоверность результатов подтверждается результатами экспериментов, проведенными соискателем и результатами экспериментов других авторов. Методики построения математических моделей базируются на общепринятой математической теории пластичности.

Научная новизна заключается в:

- разработанной обобщенной математической модели процесса гибки тонкостенных труб при гибке с постоянной температурой нагрева и с применением градиентного нагрева, учитывающей смещение нейтральной линии;

- полученных универсальных аналитических зависимостях, позволяющих определить утонение стенки в зависимости от радиуса гиба и функции распределения напряжений текущести по сечению трубы;

- созданной конечно-элементной модели процесса гибки тонкостенных труб с градиентным нагревом, позволяющей определить утонение и параметры напряженно-деформированного состояния материала трубы в зависимости от геометрических размеров сечения, свойств материала и функции распределения температуры нагрева по сечению трубы.

Практическая значимость заключается в:

- конструкции специального станка модели СГИН-120 для гибки с узкозональным индукционным нагревом тонкостенных трубопроводов агрегатов изделий ракетно-космической техники;

- конструкции и алгоритма работы устройства для создания и контроля градиентного нагрева, позволяющего снизить утонение при гибке тонкостенных трубопроводов с узкозональным индукционным нагревом.

Положения, выносимые на защиту:

- установленная закономерность изменения положения нейтральной линии при гибке тонкостенных труб с узкозональным индукционным нагревом при постоянной температуре нагрева и при применении градиентного нагрева;

- разработанная методика контроля деформаций стенки при гибке тонкостенных труб с градиентным нагревом на основании данных измерения температуры нагрева в четырех точках на поверхности трубы.

Апробация работы. Основные положения и материалы работы доложены и обсуждены на: заседаниях научно-технического совета ФГУП «НПО «Техномаш», Москва. 2013-2017; «XXXIV Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения акад. В.П. Макеева». Миасс, 2014; научных семинарах кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2016-2018.

Личный вклад автора состоит в выборе и обосновании использованных методов и средств исследования; в проведении аналитического обзора научно-технической информации по теме исследования в российской и зарубежной литературе; в разработке математической модели процесса формоизменения; в подготовке и проведении экспериментальных исследований; в разработке конструкции станка для гибки труб; в обработке и анализе экспериментальных данных.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 15 научных работах общим объемом 4,3 печ. л., в том числе в 6 изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ и в 5 патентах РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, общих выводов и заключения. Общий объем диссертации составляет 189 страниц. Диссертация содержит 114 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 114 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ современного состояния технологии гибки труб с узкозональным индукционным нагревом.

Обзор технической литературы показал, что из существующих схем гибки с узкозональным нагревом: с отклоняющим роликом и с поворотным рычагом (Рисунок 1), наиболее подходящей для гибки тонкостенных труб является схема гибки с поворотным рычагом, которая позволяет получать гибы малого радиуса высокой геометрической точности. При рассмотрении силовых факторов, возникающих при гибке, установлено, что продольная сила при гибке с поворотным рычагом определяется как отношение изгибающего момента к радиусу гиба по средней линии.

$$F_z = M/R \quad (1)$$

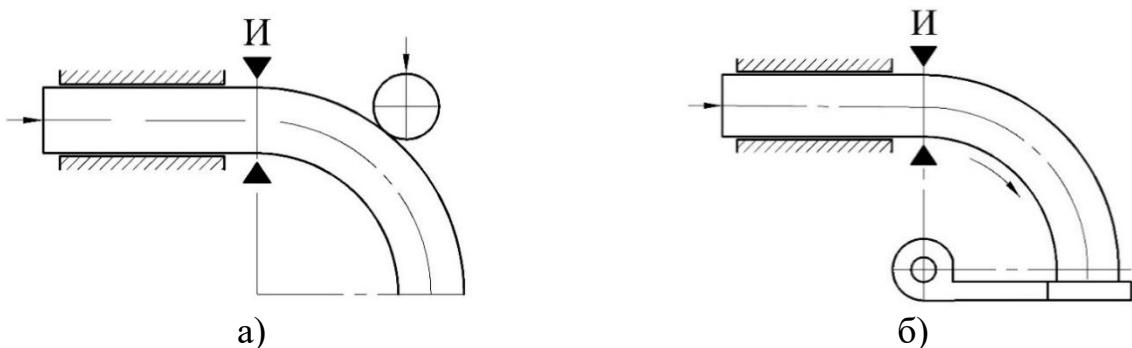


Рисунок 1. Схемы гибки с узкозональным нагревом (И – индуктор):
а) гибка с отклоняющим роликом; б) гибка с поворотным рычагом

Для создания узкой зоны нагрева при гибке используются индукторы специальной конструкции с комбинированным воздушным и водяным охлаждением. Исследования индукционного нагрева показывают, что применение подобных индукторов позволяет получать зону нагрева, резко разграниченную с холодными участками трубы. Исследования температурного режима показывают, что температуру нагрева стенки трубы можно считать постоянной по толщине при отношении внутреннего диаметра к наружному $D_{\text{внут}}/D_{\text{нар}} > 0,8$.

Анализ свойств коррозионностойких сталей, применяемых при изготовлении трубопроводов РКТ, показал, что при рабочих температурах нагрева упрочнение, а также размер упругой зоны при гибке на малые радиусы пренебрежимо малы.

Показано, что основными дефектами при гибке с узкозональным нагревом являются овализация поперечного сечения, гофрообразование и утонение стенки. Установлено, что риск гофрообразования и степень овализации поперечного сечения уменьшается при уменьшении ширины зоны нагрева, при этом применение со-

временных средств нагрева и охлаждения трубы позволяет свести степень овализации и риск гофрообразования к минимуму. Утонение стенки не зависит от ширины зоны нагрева и является основным дефектом при гибке с узкозональным нагревом.

Анализ способов борьбы с утонением стенки показал, что основным принципом уменьшения утонения является смещение нейтральной линии в сторону зоны растяжения. Этого можно достичь двумя способами: гибкой с подпором, путем приложения дополнительных сжимающих напряжений и гибкой с градиентным нагревом, при которой температуру зоны сжатия увеличивают, а зоны растяжения уменьшают. При гибке с градиентным нагревом отсутствует силовое воздействие на трубу, что снижает риск гофрообразования по сравнению с гибкой с подпором и делает данный метод наиболее предпочтительным при гибке тонкостенных труб.

Проведенные патентные исследования показали, что наиболее перспективным способом создания градиентного нагрева является смещение кольца индуктора в плоскости, перпендикулярной плоскости гиба, так как данный способ позволяет осуществлять плавное регулирование степени градиентного нагрева в автоматизированном режиме.

В настоящее время известны следующие способы определения утонения стенки: на основании эмпирических данных; аналитически, исходя из одноосного либо двухосного напряженного состояния; методом конечных элементов.

Эмпирические данные об утонении представлены, как правило, в виде зависимостей утонения стенки от радиуса гиба. Анализ существующих зависимостей показал, что они противоречивы и пригодны лишь для оценочных расчетов.

При теоретических расчетах, как правило, принимают одноосную модель напряженного состояния материала, а утонение определяют исходя из условия сохранения объема, считая, что нейтральная линия всегда совпадает со средней линией, что не позволяет использовать ее для исследований применения градиентного нагрева. В модели, разработанной Wang Zutang и Hu Zhong, принимается двухосное напряженное состояние материала, а расчет утонения основан на уравнении равновесия сечения трубы под действием внешних и внутренних сил. Проведенный анализ показал, что модель содержит неточности при анализе смещения нейтральной линии и потому не может использоваться для исследования гибки с градиентным нагревом.

Проведенный анализ компьютерных моделей гибки с применением метода конечных элементов, выполненный в таких программах, как ANSYS, DEFORM-3D, ABAQUS, ADINA, Simufact Forming, показал, что ни одна из моделей не пригодна в полной мере для исследования применения градиентного нагрева из-за значительного (до 15%) разброса значений утонения в зависимости от угла гиба и ограниченности средств для варьирования параметров градиентного нагрева.

Во второй главе представлены теоретические исследования образования утонения при гибке с поворотным рычагом, проведенные с использованием «инженерного» метода с учетом следующих допущений:

- пластические деформации в холодной зоне пренебрежимо малы;
- поперечное сечение сохраняет круглость при гибке;
- величина переходного участка между зоной нагрева и холодной зоной пренебрежимо мала;
- принимается идеальная жесткопластическая модель материала;
- температура нагрева стенки трубы по глубине постоянна;
- стенка трубы деформируется симметрично относительно ее центра.

Вначале был рассмотрен случай гибки с постоянной температурой нагрева.

В этом случае напряжения текучести в зоне нагрева постоянны ($\sigma_s = \text{const}$).

Рассмотрим участок, непосредственно прилегающий к холодной зоне, соответствующий углу $d\alpha$ (Рисунок 2). Удлинение и укорочение материала вызывает появление осевых напряжений σ_z и соответствующих им осевых деформаций ε_z . Утонение и утолщение стенок трубы вызывает появление круговых напряжений σ_θ и радиальных деформаций ε_ρ . Так как значение $d\alpha$ бесконечно мало, то круговыми деформациями можно пренебречь ($\varepsilon_\theta \approx 0$), а радиальные напряжения считать много меньше кольцевых и осевых ($\sigma_\rho \ll \sigma_\theta, \sigma_z$).

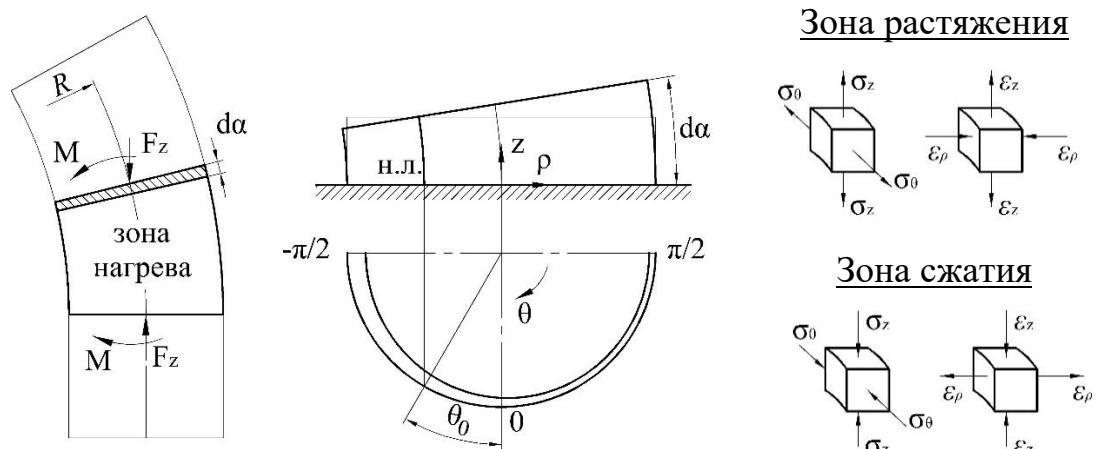


Рисунок 2. Напряженно-деформированное состояние при гибке с постоянной температурой (н.л. – нейтральная линия)

Уравнения равновесия приобретут следующий вид:

$$\begin{cases} \partial\sigma_\theta/\partial\theta = 0 \\ \partial\sigma_z/\partial z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \sigma_\theta = \sigma_\theta(\rho, z) \\ \sigma_z = \sigma_z(\rho, \theta) \end{cases}$$

Подставляя уравнение Генки - Ильюшина относительно круговых деформаций ($\varepsilon_\theta = \varepsilon_i/\sigma_i \cdot (\sigma_\theta - (\sigma_z + \sigma_\rho)/2)$), а также условие пластичности Губера - Мизеса ($(\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_\rho)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 = 2\sigma_s^2$), получаем:

$$\sigma_z = \pm 2/\sqrt{3} \cdot \sigma_s; \quad \sigma_\theta = \pm 1/\sqrt{3} \cdot \sigma_s \quad (2)$$

Утонение стенки трубы можно найти из условия постоянства объема, зная деформации в осевом направлении (Рисунок 3).

Пренебрегая кривизной и смещением сечений относительно друг друга, вследствие малости угла $d\alpha$, получаем выражение для определения относительного утонения:

$$\delta_S = \frac{\Delta S}{S} = \frac{(\sin \theta_0 - \sin \theta)}{(2\bar{R} + \sin \theta)}, \quad (3)$$

где \bar{R} – относительный радиус гиба ($\bar{R} = R/D$).

Найти положение нейтральной линии можно из условия равновесия сечения, к которому приложена нагрузка.

$$\iint_A \sigma_z dA = F_z, \quad (4)$$

где A – площадь поперечного сечения.

При гибке чистым моментом сила $F_z = 0$. Тогда подставляя (2) и (3) в (4), получаем интегральное уравнение, решением которого является угол нейтральной линии θ_0 , который определяет максимальное относительное утонение δ_{Smax} .

$$\theta_0 = -\arcsin(1/2 \cdot \bar{R}); \delta_{Smax} = -1/2 \cdot \bar{R}$$

При гибке поворотным рычагом появляется продольная сила, определяющаяся выражением (1). Уравнение равновесия при этом приобретет следующий вид.

$$\iint_A \sigma_z dA = -\frac{1}{\bar{R}} \iint_A \sigma_z \cdot (\sin \theta - \sin \theta_0) dA \quad (5)$$

Решением интегрального уравнения (5) для любого значения \bar{R} является нулевое значение угла нейтральной линии, значит при гибке поворотным рычагом нейтральная линия совпадает со средней линией трубы.

$$\theta_0 = 0; \delta_{Smax} = -1/(2\bar{R} + 1) \quad (6)$$

При гибке с градиентным нагревом напряжения текучести непостоянны ($\sigma_s = \sigma_s(\theta) \neq const.$). Степень градиентного нагрева удобно определять коэффициентом градиента напряжений K_σ , равным отношению минимальных напряжений текучести (σ'_s) к максимальным (σ''_s).

Разница напряжений текучести в зонах растяжения и сжатия влечет появление касательных напряжений $\tau_{\rho\theta}$. Аналитические расчеты показали, что касательные напряжения $\tau_{\rho\theta}$ уменьшают осевые напряжения σ_z не более чем на 3,2% при $\bar{R} > 1,5$ и $K_\sigma > 0,5$. Это позволяет использовать выражения (2) и (5) для определения положения нейтральной линии и при градиентном нагреве.

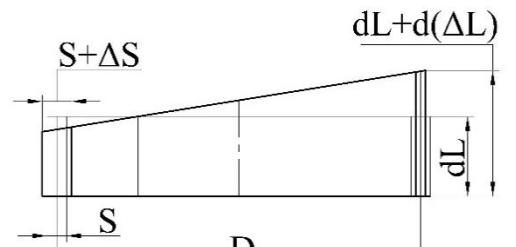


Рисунок 3. Деформации стенки трубы при гибке

Были найдены аналитические решения уравнения (5) для двух частных случаев градиентного нагрева: при ступенчатом и линейном распределении напряжений текучести по сечению.

При ступенчатом распределении напряжения текучести минимальны в зоне растяжения и максимальны в зоне сжатия с переменой знака на нейтральной линии. Такое распределение напряжений текучести дает максимальное смещение нейтральной линии и уменьшение утонения.

$$\sigma_s(\theta) = \begin{cases} \sigma'_s, \theta \in (\theta_0; \pi/2] \\ \sigma''_s, \theta \in [-\pi/2; \theta_0) \end{cases} \quad (7)$$

Решением уравнения (5) для функции распределения (7) с погрешностью не более 5% при $\bar{R} > 1,5$ и $K_\sigma > 0,5$ является следующее значение θ_0 .

$$\theta_0 = \left(\frac{1 - K_\sigma}{1 + K_\sigma} \right) \operatorname{arctg}(2\bar{R}) - \left(\frac{3}{4\bar{R}} - \bar{R} \right) - \sqrt{\left(\left(\frac{1 - K_\sigma}{1 + K_\sigma} \right) \operatorname{arctg}(2\bar{R}) - \left(\frac{3}{4\bar{R}} - \bar{R} \right) \right)^2 - \pi \bar{R} \left(\frac{1 - K_\sigma}{1 + K_\sigma} \right) \left(1 - \frac{1}{4\bar{R}^2} \right)}$$

При линейном распределении функция напряжений текучести выглядит следующим образом.

$$\sigma_s(\theta) = (\sigma''_s - \sigma'_s)/2 \cdot \sin \theta + (\sigma''_s + \sigma'_s)/2 \quad (8)$$

Решение уравнения (5) для функции распределения (8) с погрешностью не более 2% при $\bar{R} > 1,5$ и $K_\sigma > 0,5$ дает следующее значение θ_0 .

$$\theta_0 = \left(\bar{R} - \frac{1}{2\bar{R}} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1 - K_\sigma}{1 + K_\sigma} \right) - \sqrt{\left(\bar{R} - \frac{1}{2\bar{R}} \right)^2 - \bar{R} \left(\frac{1 - K_\sigma}{1 + K_\sigma} \right) + \left(\frac{1 - K_\sigma}{1 + K_\sigma} \right)^2}$$

Для оценки эффективности применения градиентного нагрева вводится величина – относительное уменьшение утонения $\Delta\delta_S = (\Delta S - \Delta S')/\Delta S$, где $\Delta S'$ – деформации стенки при гибке с градиентным нагревом, ΔS – деформации стенки при аналогичной гибке без градиентного нагрева.

Для определения общих закономерностей применения градиентного нагрева был выполнен численный расчет уравнения (4) для функций $\sigma_s(\theta)$ следующего вида: $\sigma_s = A \sin^{2n+1} \theta + B$; $\sigma_s = A^{2n+1} \sqrt{\sin \theta} + B$; $\sigma_s = A/2^{2n+1} (\sin \theta + 1)^{2n+1} + B$; $\sigma_s = A/\sqrt[2n+1]{2} \cdot \sqrt[2n+1]{\sin \theta + 1} + B$, где A, B, n – постоянные.

При анализе результатов численных расчетов установлено, что при $\bar{R} > 1,5$, $K_\sigma > 0,5$ и с погрешностью не более 10% относительное уменьшение утонения $\Delta\delta_S$ линейно зависит от коэффициента градиента напряжений K_σ и не зависит от относительного радиуса гиба \bar{R} .

$$\Delta\delta_S = K_f (1 - K_\sigma), \quad (9)$$

где K_f – коэффициент, характеризирующий форму функции распределения напряжений текучести по сечению. Для линейного распределения напряжений текучести $K_f = 0,673$, для ступенчатого – $K_f \approx 1$.

В третьей главе представлены исследования образования утонения при гибке поворотным рычагом, проведенные с использованием метода конечных элементов в среде Ansys Workbench. Моделировалась гибка трубы 36x2 мм из коррозионностойкой стали AISI 321 (аналог 12Х18Н9Т). Ширина зоны нагрева принималась равной 4 мм.

Поскольку при гибке материал трубы деформируется только в узкой нагретой зоне, а геометрия будущего трубопровода формируется в момент охлаждения трубы, то для определения утонения готового трубопровода на основном участке гибки достаточно промоделировать деформирование участка трубы длиной, равной ширине зоны нагрева. Действие поворотного рычага может быть смоделировано плоскостью, прикрепленной к одному торцу трубы, а для моделирования действия направляющей фильтры противоположный торец должен быть закреплен от поперечных перемещений. Деформирование происходит путем задания перемещения левому торцу трубы на величину, равную длине моделируемого участка. При перемещении трубы плоскость, с закрепленным на ней правым торцом трубы, поворачивается, деформируя трубу. Радиус гиба устанавливается изменением расстояния от оси поворота плоскости до центра трубы (Рисунок 4).

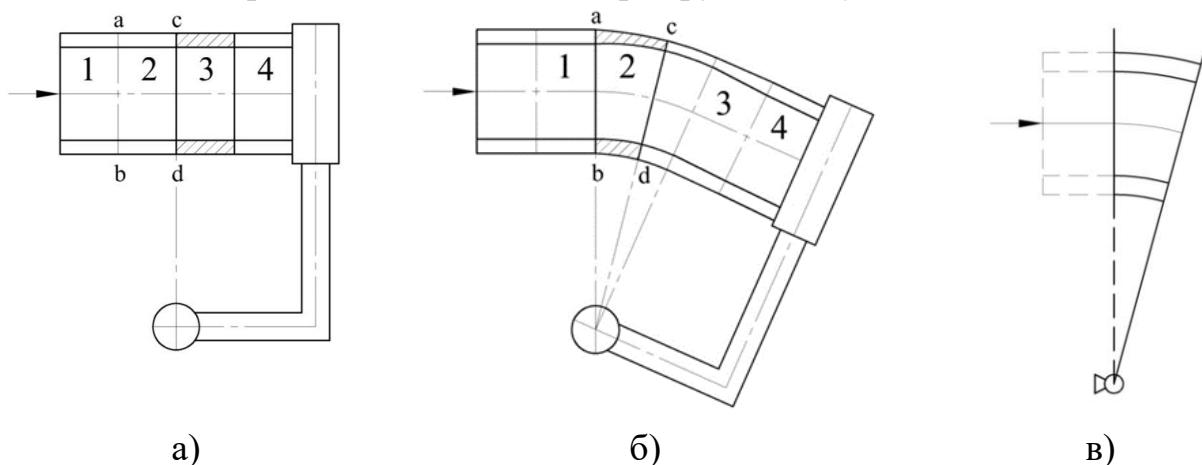


Рисунок 4. Схема деформирования материала при гибке

поворотным рычагом (зона нагрева заштрихована)

а) – начальный момент; б) – промежуточный момент; в) – расчетная схема

Сетка конечных элементов цилиндра состоит из объемных 20-узловых элементов SOLID186 размером 0,5 мм. Плоскость, моделирующая поворотный рычаг, является жесткой оболочкой толщиной 1 мм. Распределение температуры нагрева по сечению устанавливается соответствующим граничным условием (Thermal Condition). Для задания свойств пластичности материала использовалась линейная аппроксимация кривой упрочнения 1 рода (Bilinear Isotropic Hardening).

Как и во второй главе, вначале была исследована гибка при постоянной температуре нагрева. Температура нагрева устанавливалась равной 758°C. При моделировании были получены деформации стенки трубы (Рисунок 5).

Анализ зависимости утонения от радиуса гиба показал, что моделирование дает значения утонения в среднем на 10% выше, по сравнению с аналитическим расчетом, что можно объяснить наличием поперечной силы, действие которой не учитывалось в аналитической модели. Установлено, что значения круговых и осевых напряжений на порядок превосходят значения остальных компонентов тензора напряжений и отличаются не более чем на 20% от аналитических, с поправкой на упрочнение.

При исследовании гибки с градиентным нагревом температура нагрева зоны сжатия (t') принималась равной 816°C, а зоны растяжения (t'') – 704°C, 593°C, 482°C. Расчеты проводились для функций распределения температуры следующего вида:

$$t_1(x) = (t'' + t')/2 + (t' - t'')/36 \cdot x$$

$$t_2(x) = t'' + (t' - t'')/2^3 \cdot (x/18 + 1)^3$$

$$t_3(x) = t'' + (t' - t'')/2^7 \cdot (x/18 + 1)^7,$$

где x – расстояние до центра трубы.

В результате получены следующие графики (Рисунок 6).

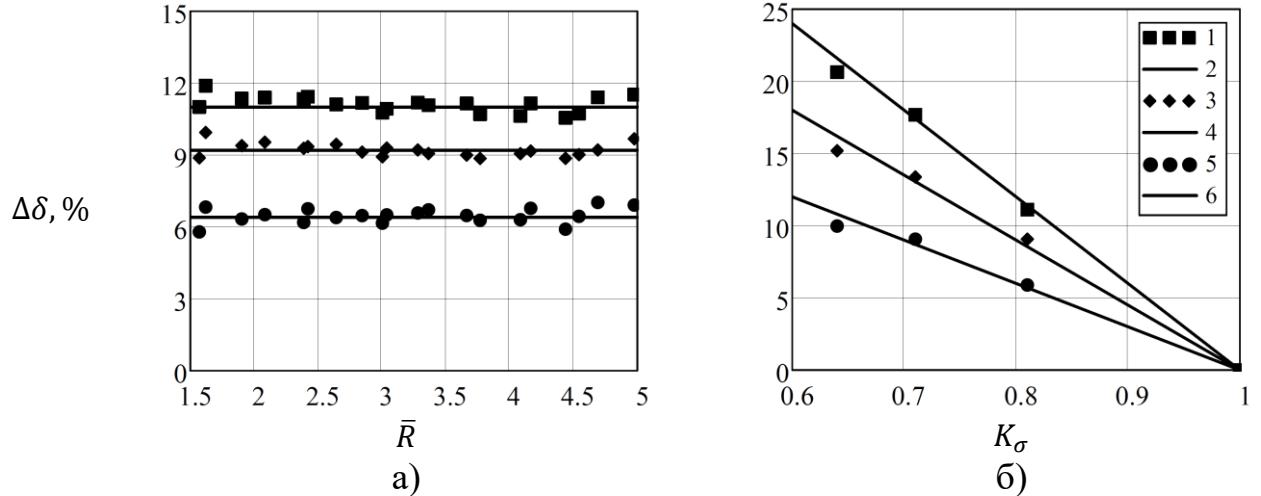


Рисунок 6. Относительное уменьшение утонения: а) – зависимость $\Delta\delta(\bar{R})$; б) – зависимость $\Delta\delta(K_\sigma)$ (1, 3, 5 – результаты для функций t_1 , t_2 , t_3 соответственно; 2, 4, 6 – аппроксимирующие функции)

Согласно результатам моделирования, относительное уменьшение утонения с точностью $\pm 5\%$ не зависит от радиуса гиба, а зависимость относительного уменьшения утонения от коэффициента градиента напряжений с точностью $\pm 4\%$ является линейной. Это полностью соответствует выводам, полученным при аналитическом расчете, и говорит о том, что выражение (9) справедливо и для результатов, полученных при помощи метода конечных элементов.

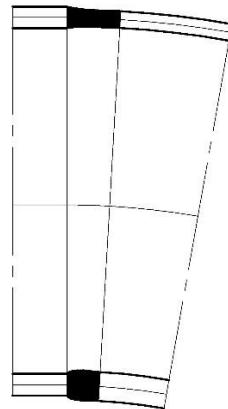


Рисунок 5. Деформации стенки при $\bar{R} = 2$

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований образования утонения при гибке поворотным рычагом с индукционным нагревом труб Ø36x2 мм из коррозионностойких сталей 12Х18Н9Т и ВНС16.

Эксперименты проводились на специальном станке для гибки труб с узкозональным индукционным нагревом СГИН-120, который был разработан на основании проведенных теоретических исследований. Конструкция станка защищена четырьмя патентами РФ на полезную модель (№128265, №144696, №154035, №169825). Станок оснащен системой ЧПУ, имеет семь независимых осей и предназначен для автоматизированной многоколенной гибки труб (Рисунок 7).

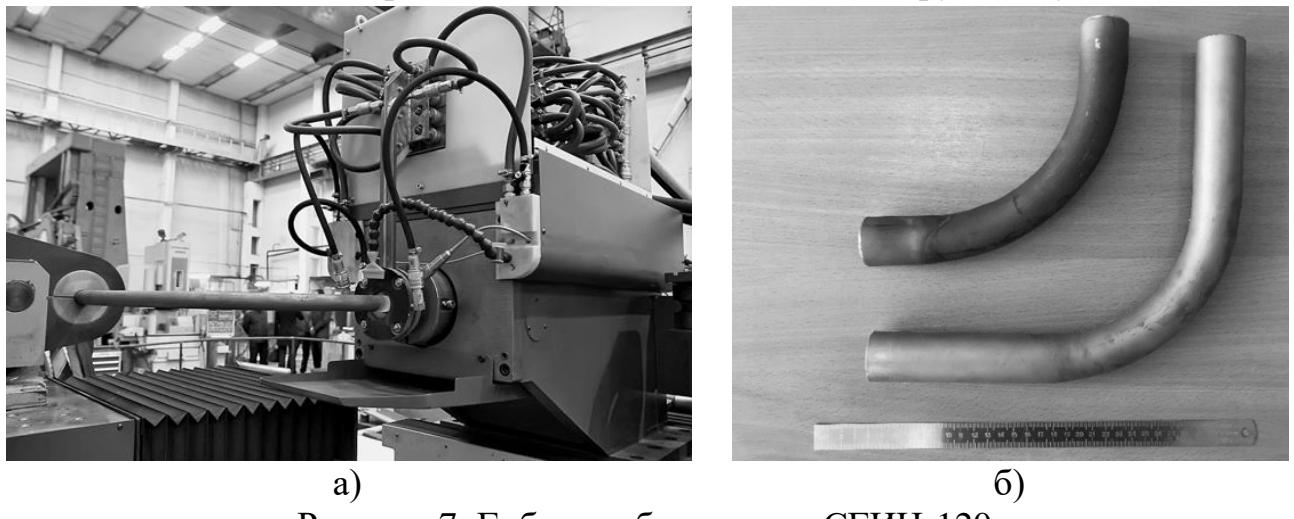


Рисунок 7. Гибка труб на станке СГИН-120:

а) – гибка поворотным рычагом; б) – полученные образцы

Эксперименты проводились при гибке поворотным рычагом с постоянной температурой нагрева, в ходе которых определялась зависимость утонения δ_S от радиуса гиба, и при градиентном нагреве, в ходе которых определялась зависимость относительного уменьшения утонения $\Delta\delta_S$ от радиуса гиба.

Радиус гиба измерялся системой ЧПУ станка, исходя из длины полученной дуги, зная величины подачи трубы и угла поворота рычага:

$$R = 180L/(\pi\alpha),$$

где L – величина продольной подачи, мм; α – угол поворота рычага, град.

Утонение стенки трубы измерялось с помощью ультразвукового толщиномера АКС А1209. Измерения проводились с наружной стороны изогнутой трубы. Для повышения точности измерений толщиномер калибровался на материале трубы по показаниям трубного микрометра МТЦ-25-0,001, точность измерений при этом составляет 0,05 мм. Прямые измерения разрезанной трубы проводились также микрометром МТЦ-25-0,001.

Температура нагрева контролировалась пиromетром индуктора. Система ЧПУ станка при этом позволяет поддерживать заданное значение температуры с точностью до $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

Градиентный нагрев устанавливался регулированием подачи охлаждающей воды. Конструкция станка позволяет независимо регулировать подачу воды на стороны растяжения и сжатия трубы, что позволяет устанавливать градиент температуры нагрева.

Относительное уменьшение утонения $\Delta\delta_S$ при градиентном нагреве измерялось косвенным методом. Смещение нейтральной линии в сторону зоны растяжения при градиентном нагреве влечет уменьшение длины трубы по осевой линии, по сравнению с гибкой при постоянной температуре нагрева. Данное изменение можно вычислить, зная радиус гиба, угол поворота гибочного рычага и сравнивая величины продольной подачи при гибке с градиентным нагревом (l') и без такового (l). Данная методика была подтверждена экспериментально.

$$\Delta\delta_S = 2\bar{R}(l - l')/l' \quad (10)$$

Эксперименты по гибке с постоянной температурой нагрева показали следующие результаты (Рисунок 8). Приведены также результаты аналогичных экспериментов из других источников.

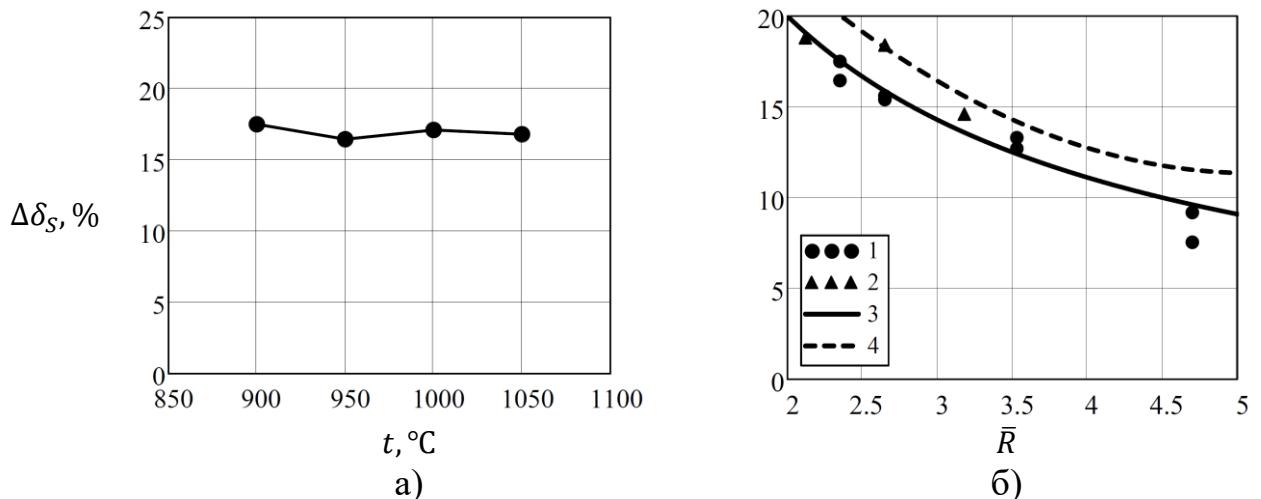


Рисунок 8. Утонение при гибке с постоянной температурой: а) – зависимость утонения от температуры нагрева; б) – зависимость утонения от относительного радиуса гиба (1 – экспериментальные значения; 2 – результаты Wang Zutang и Hu Zhong; 3 – аналитические значения; 4 – результаты моделирования)

Гибка при различной температуре нагрева показала, что колебания температуры в пределах $\pm 50^\circ\text{C}$, с погрешностью 5%, не оказывают влияние на величину максимального утонения. Гибка на различные радиусы показала, что аналитические выражения (6) определяют утонение с максимальной погрешностью 7% – для результатов, полученных на станке СГИН-120, и 6% – для результатов экспериментов по гибке труб 89x6 и 89x4,5 мм, проведенных Wang Zutang и Hu Zhong.

Из результатов экспериментов следует, что моделирование дает значения утонения завышенные на 15%, что можно объяснить отсутствием овализации поперечного сечения при учете действия поперечной силы в модели.

Эксперименты по гибке с градиентным нагревом показали следующие результаты (Рисунок 9). Образец трубы, полученный гибкой с градиентным нагревом, был разрезан для проведения прямого измерения толщины стенки в пяти точках в зоне растяжения. Результаты измерений показали, что относительное уменьшение утонения составило 6%, а значение, полученное по формуле (10), составило 5,6%. Проведенные измерения показали также, что утонение, с погрешностью не более 6%, не зависит от угла гиба.

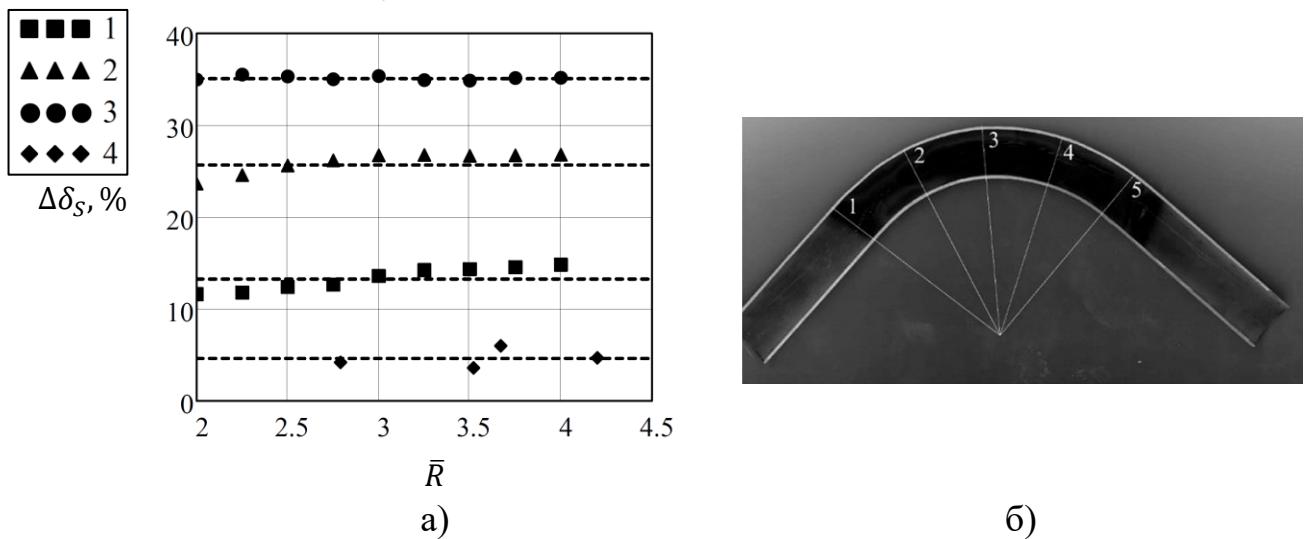


Рисунок 9. Результаты экспериментов по гибке с градиентным нагревом:
а) – относительное уменьшение утонения (1, 2, 3 – данные Yeow Hwa Engineering;
4 – экспериментальные значения); б) – продольный разрез трубы

Как можно видеть по графикам, значения относительного уменьшения утонения отличаются от среднего значения в среднем на 15 % – для результатов, полученных на станке СГИН-120, и 14% – для результатов фирмы Yeow Hwa Engineering (Сингапур). Полученные результаты подтверждают теоретический вывод о том, что относительное уменьшение утонения мало зависит от радиуса гиба.

В пятой главе представлены теоретические основы работы устройства для создания и контроля градиентного нагрева, необходимость разработки которого вызвана несовершенством конструкции станка СГИН-120, не позволяющего контролировать распределение температуры по сечению трубы при гибке.

Создание градиентного нагрева в устройстве происходит за счет поперечного смещения кольца индуктора с контролем температуры нагрева в нескольких точках бесконтактными пирометрами (Рисунок 10). Координата установки пирометра на кольце индуктора (φ) и координата точки измерения температуры на трубе (θ) связаны следующим выражением:

$$\theta = \varphi + \arcsin(2e \cos \varphi / (D + S))$$

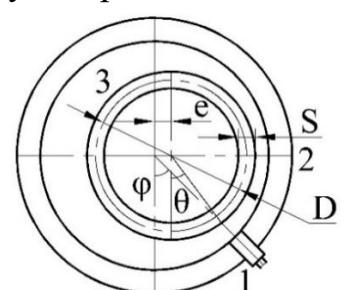


Рисунок 10. Схема градиентного нагрева (1 – пирометр;
2 –индуктор; 3 –труба)

Для получения функции распределения напряжений текучести и температуры по сечению трубы значения, полученные от пиromетров, должны быть интерполированы. Было проведено сравнение различных алгоритмов интерполяции (интерполяция кубическими сплайнами с кубическими, параболическими и линейными конечными точками, линейная интерполяция, интерполяция методом Лагранжа) и вариантов расположения пиromетров. Сравнение проводилось аналитически по точности вычисления угла нейтральной линии по сравнению с точным решением уравнения (5). Наилучший результат (11,2%) показал алгоритм Лагранжа с измерением температуры в точках с координатами ($-90^\circ; -60^\circ; 60^\circ; 90^\circ$) относительно кольца индуктора. Тогда, с учетом свойства материала, интерполирующая функция напряжений текучести примет следующий вид.

$$\sigma_s = a_1\theta^3 + a_2\theta^2 + a_3\theta + a_4,$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты многочлена Лагранжа.

Решая уравнение (5), относительно полученной интерполирующей функции, получаем следующее выражение.

$$\theta_0 = \frac{a_1 \frac{\pi^4}{32} + a_3 \frac{\pi^2}{4}}{2a_4 + \ln \frac{4\bar{R}^2}{\pi^2} (8a_1\bar{R}^3 - 4a_2\bar{R}^2 + 2a_3\bar{R} - a_4) - \frac{\pi^2}{4} (2a_1\bar{R} - a_2)} \quad (11)$$

Устройство работает по следующему алгоритму:

1. Сбор данных о температуре нагрева.
2. Если и максимальное и минимальное значения температуры выходят из границ диапазона допустимых температур, то система уменьшает эксцентриситет индуктора либо мощность системы нагрева.
3. Вычисляются значения напряжений текучести, соответствующие измеренным значениям температуры.
4. Вычисляются коэффициенты многочлена Лагранжа, затем по выражению (11) вычисляется угол нейтральной линии θ_0 .
5. В зависимости от полученного значения угла нейтральной линии уменьшают или увеличивают эксцентриситет индуктора.
6. Если гибка продолжается, то процедура повторяется.

На разработанное устройство получен патент РФ №169827.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ современного состояния технологии гибки труб с узкозональным индукционным нагревом, показал, что основным дефектом при гибке является утонение стенки, наиболее перспективным способом борьбы с которым при гибке тонкостенных труб является применение градиентного нагрева. Обзор существующих моделей образования утонения показал, что ни в одной из них в полной мере не обосновано принятное положение нейтральной линии и потому они не пригодны для исследований градиентного нагрева.

2. Разработанная обобщенная математическая модель образования утонения при гибке тонкостенных труб с узкозональным нагревом показала, что при гибке поворотным рычагом с постоянной температурой нагрева нейтральная линия совпадает с геометрической осью трубы. Получена зависимость утонения от радиуса гиба, позволяющая, по результатам экспериментов, определить утонение с точностью $\pm 3,5\%$ при гибке поворотным рычагом с постоянной температурой нагрева.

3. Разработанная обобщенная математическая модель позволила получить аналитические выражения для определения утонения в зависимости от функции распределения напряжений текучести по сечению. Установлено, что в общем случае уменьшение утонения в результате применения градиентного нагрева можно считать с точностью $\pm 5\%$ линейно зависящим от степени градиентного нагрева и не зависящим от радиуса гиба.

4. На основе конечно-элементной модели гибки тонкостенных труб с градиентным нагревом, разработанной в среде Ansys Workbench, установлено, что, при гибке трубы 36x2 мм из стали AISI 321 уменьшение утонения в результате применения градиентного нагрева с точностью $\pm 5\%$ не зависит от радиуса гиба и с точностью $\pm 4\%$ линейно зависит от степени градиентного нагрева.

5. В ходе проведения экспериментов по гибке труб 36x2 мм из стали ВНС16 на станке СГИН-120, установлено, что уменьшение утонения, в результате применения градиентного нагрева с точностью $\pm 7,5\%$ не зависит от радиуса гиба, что согласуется с результатами экспериментов других авторов. Уменьшение утонения составило 6%, что позволяет снизить массу трубопровода на 8%.

6. Разработанная методика автоматизированного контроля градиентного нагрева позволяет определять положение нейтральной линии при гибке на основании результатов измерения температуры нагрева в 4 точках с последующей интерполяцией методом Лагранжа. Разработанная методика реализована в конструкции устройства, обеспечивающего поддержание необходимой степени градиентного нагрева в автоматизированном режиме.

7. Для дальнейшего совершенствования гибки с узкозональным градиентным нагревом необходимо исследовать совместное действие градиентного нагрева и подпорного момента, а также исследовать применение градиентного нагрева при гибке толстостенных труб.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1 **Долгополов М.И.**, Корнилов В.А., Панов Д.В. Уменьшение предельного радиуса гиба при гибке с узкозональным индукционным нагревом труб изделий РКТ путем применения градиентного нагрева // Технология машиностроения. 2015. № 11. С. 21-24. (0,6 п.л./ 0,4 п.л.).

- 2 **Долгополов М.И.** Оценка утонения тонкостенных труб при гибке с узкозональным индукционным нагревом // Технология машиностроения. 2016. № 11. С. 9-14. (0,9 п.л.).
- 3 **Долгополов М.И.**, Евсюков С.А. Исследование гибки тонкостенных труб с узкозональным градиентным нагревом // Заготовительные производства машиностроения. 2019. Т. 17, № 2. С. 61-65. (0,6 п.л./ 0,4 п.л.).
- 4 **Долгополов М.И.**, Евсюков С.А. Определение утонения тонкостенных труб при гибке с узкозональным градиентным нагревом Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 5. С. 345-354. (0,7 п.л./ 0,5 п.л.).
- 5 **Долгополов М.И.**, Корнилов В.А. Изгиб трубы проталкиванием на трубогибочном станке // Технология машиностроения. 2016. № 7. С. 21-25. (0,5 п.л./ 0,4 п.л.).
- 6 **Долгополов М.И.**, Корнилов В.А. Методы борьбы с основными дефектами при гибке труб с узкозональным индукционным нагревом // Технология машиностроения. 2016. № 12. С. 15-19. (0,8 п.л./ 0,6 п.л.).
- 7 **Долгополов М.И.**, Корнилов В.А. Применение градиентного нагрева при гибке с узкозональным индукционным нагревом труб изделий РКТ // Вестник «НПО «Техномаш». 2017. № 2. С. 49-50. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.).
- 8 **Долгополов М.И.**, Корнилов В.А., Андреев М.Д. Компьютерное моделирование гибки труб с узкозональным индукционным нагревом // Вестник «НПО «Техномаш». 2018. № 8. С. 44-47. (0,4 п.л./ 0,3 п.л.).
- 9 **Долгополов М.И.**, Корнилов В.А., Андреев М.Д. Технология гибки трубопроводов РКТ с применением узкозонального индукционного нагрева // Вестник «НПО «Техномаш». 2018. № 7. С. 74-77. (0,8 п.л./ 0,5 п.л.).
- 10 Изготовление трубопроводов жидкостных ракетных двигателей из труднодеформируемых и малопластичных сплавов / **М.И. Долгополов**[и др.] // Наука и технологии.: Тез. докл. XXXIV Всерос. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения акад. В.П. Макеева. Миасс. 2014. Т. 4. С.143-151. (0,6 п.л./ 0,2 п.л.).
- 11 Зажимное устройство: патент 128265 РФ / **М.И. Долгополов**[и др.]; заявл. 26.12.2012; опубл. 20.05.2013. Бюлл. №14.
- 12 Индукционное устройство трубогибочного станка с программным управлением: патент 169827 РФ / **М.И. Долгополов**[и др.]; заявл. 30.03.2016; опубл. 03.04.2017. Бюлл. №10.
- 13 Поворотный узел трубогибочного станка: патент 154035 РФ / **М.И. Долгополов**[и др.]; заявл. 28.11.2014; опубл. 10.08.2015. Бюлл. №22.
- 14 Трубогибочный станок: патент 169825 РФ / **М.И. Долгополов**[и др.]; заявл. 30.06.2016; опубл. 03.04.2017. Бюлл. №10.
- 15 Устройство для зонального нагрева: патент 144696 РФ / **М.И. Долгополов**[и др.]; заявл. 28.03.2014; опубл. 27.08.2014. Бюлл. №24.