В Диссертационный совет Д999.115.03 при ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Лавриненко Ю.А. на диссертацию Зайцева Алексея Ивановича «Разработка процессов гибки труб с осевым сжатием в пределах допустимого волнообразования», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением.

Актуальность работы. Гибка труб с осевым сжатием находит все большее применение, позволяя улучшать качество изделий по показателям утонения сечений. стенки И овальности Современные модели трубогибочного оборудования оснащают устройствами дозированного сжатия зоны деформирования. Эффективность их применения сдерживается отсутствием надежных критериев устойчивости изгибаемых труб, начальное нарушение которой в виде слабого волнообразования вообще не изучалось, несмотря на то, что оно допускается техническими требованиями к трубопроводам и другим изделиям. Работа Зайцева А.И. направлена на восполнение указанного пробела, в ней сформулированы и решены задачи теоретического и практического плана:

- разработать математическую модель гибки трубы моментом с монотонным развитием волнистости в области сжатия, а также методику ее практического использования для оценки высоты слабо выраженных волн.

- выполнить теоретический анализ гибки труб отклоняющим роликом и неприводным водилом с определением допустимых углов его поворота, ограниченных реверсом деформаций.
- разработать методику инженерного расчета осевой силы и подачи при гибке труб проталкиванием через зону деформирования;
- разработать методику проектирования процессов гибки труб с осевым сжатием и усовершенствовать их техническое оснащение.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, основной части, включающей пять разделов, заключения и списка использованных источников в количестве 53. Общее число страниц 118, рисунков — 41, таблиц — 7.

В первом разделе большое место занимает анализ публикаций по устойчивости тонкостенных труб, содержащих теоретические и экспериментальные исследования процесса гибки. Отмечается их односторонний характер, при котором констатируется эффект бифуркации, в то время как предшествующая стадия — образование слабовыраженной волнистости стенки трубы остается не исследованной.

Во втором разделе выполнено математическое моделирование пластического изгиба трубы с монотонно возрастающей волнистостью. Волнообразование увеличивает работу внутренних сил при одновременном уменьшении сопротивления внешнему моменту. Высота волн находится из условия стационарного значения полной потенциальной энергии и подсчитывается методом последовательных приближений. Ее рассчитанные значения находятся в прямой зависимости от диаметра трубы и обратной – от радиуса изогнутой оси, возрастая пропорционально заданной силе осевого сжатия. Предложена методика практического прогнозирования высоты волн без применения метода последовательных приближений – по принципу: больше или меньше допустимой.

В разработанной математической модели отсутствует механизм запуска процесса волнообразования. Принята гипотеза, согласно которой

волны бесконечно малой высоты возникают одновременно с началом искривления оси трубы — по аналогии с неравномерностью удлинения образца при испытании на растяжение. Оба процесса остаются устойчивыми, пока высота волн и неравномерность растяжения увеличиваются монотонно.

Третий раздел посвящен анализу схем гибки на большой радиус посредством проталкивания трубы через зону деформирования. В этом случае осевое сжатие носит непреднамеренный характер и может быть установлено из баланса работ внешних и внутренних сил. Основная проблема заключается в не стационарности размеров зоны деформирования при гибке водилом. Математическое моделирование процесса потребовало априорного наложения ограничений на его неизвестные геометрические параметры. Предложена аппроксимирующая функция, связывающая кривизну оси трубы, переменную во времени и пространстве, с углом поворота водила, а также уравнения для определения перемещения проталкиваемой заготовки и потребной внешней силы.

Расчеты показали, что по достижении определенного угла поворота водила порядка 60° в изогнутом участке трубы появляется очаг разгрузки. Его эволюция при дальнейшем увеличении угла приводит к появлению пластических деформаций обратного, по сравнению с гибкой, знака.

В четвертом разделе представлена упрощенная методика инженерного расчета гибки водилом с определением подачи трубы и толкающей силы. Использовалась упрощенная аппроксимация оси изогнутого участка дугой окружности или двумя сопрягающимися дугами, радиусы и углы которых подсчитывались по окончательным размерам зоны гибки. Полученная оценка силы оказалась завышенной примерно на 10%, по сравнению с моделированием изогнутой оси переменной кривизны. Длина участка трубы, заранее размещаемого в зоне деформирования, влияет на размеры изгибаемого участка, полученные формулы связывают ее обратной зависимостью с рассчитанной подачей.

В пятом разделе дано описание экспериментальной гибки труб с осевым сжатием. Она выполнялась на лабораторной установке с гидравлической системой возбуждения силы, толкающей опытный образец в направлении зоны деформирования. В области сжимающих напряжений возникали волны высотой до 0,12 мм, возрастающей с увеличением силы осевого сжатия, при этом зарегистрировано уменьшение утонения стенки в области растяжения. Совершенно очевидно, что эксперименты не позволяют зафиксировать наличие волн как угодно малой высоты. Поэтому принятую в диссертации гипотезу их зарождения в начальный момент изгиба трубы нельзя подтвердить или опровергнуть.

При гибке с осевым сжатием по схеме наматывания на круглый копир момент толкающей силы может вызвать реверсивные деформации вплоть до частичной разгибки трубы. Для решения данной проблемы предлагается устройство с опорным роликом, защищенное патентом Российской Федерации на изобретение.

Совокупность разработанных расчетных методик обеспечивает проектирование технологических процессов гибки труб с осевым сжатием, учитывающее ограничения волнообразования согласно техническим требованиям к трубопроводам, а также предельно допустимые реверсивные деформации в окрестностях замка копира или водила.

**Автореферат** диссертации идентичен ее содержанию и включает список работ автора: 5 статей в рецензируемых изданиях, 1 патент, 3 публикации в материалах конференций.

## **Научная новизна работы и ее теоретическая значимость** заключаются:

- в определении высоты слабовыраженных волн при изгибе трубы моментом с возможным приложением осевого сжатия,
- в аналитическом решении задачи статической неопределимости гибки трубы моментом, с зоной деформирования стесненной положением отклоняющего ролика или неприводным водилом,

-в разработке научно обоснованной методике инженерного расчета при гибке отклоняющим роликом и водилом с аппроксимацией изогнутого участка трубы,

-в разработке научно обоснованной методики проектирования технологических процессов гибки труб с осевым сжатием, учитывающей ограничения волнообразования согласно техническим требованиям к трубопроводам, а также предельно допустимые реверсивные деформации.

При этом разработанная математическая модель слабовыраженного волнообразования при изгибе трубы моментом и аналитическое решение задачи статически неопределимого равновесия трубы, изгибаемой водилом, вносят значительный вклад в теорию гибки труб.

Практическая ценность результатов исследования заключается в том, что разработана научно обоснованная методика расчета подачи трубы и проталкивающей силы при гибке водилом, применимая в инженерных расчетах гибки трубы с фиксированными параметрами или по заданным габаритам изогнутого участка трубы при проектировании и эксплуатации трубогибочного оборудования.

Разработана методика проектирования технологических процессов гибки труб проталкиванием через зону деформирования или наматыванием на копир с осевым сжатием, учитывающая ограничения волнообразования согласно техническим требованиям к трубопроводам

Достоверность результатов работы, обоснованность выводов и рекомендаций обеспечивается корректным применением энергетического подхода в теоретическом анализе изгиба труб с образованием волнистости; использованием аппроксимаций в разработанных математических моделях, которые носят обоснованный характер.

## Замечания по работе.

1. Не приводятся требования к материалам и трубным заготовкам, видам труб, их состоянию перед гибкой. Какие трубы можно применять для

гибки: стальные бесшовные холоднодеформированные или теплодеформированные, электросварные прямошовные, или другие? Из каких материалов трубные заготовки? Не показана область применения разработанного Вами процесса гибки труб.

- 2. Какие станки применяется в современном трубогибочном производстве? Их модели, технические характеристики?
- 3. Не приводится обоснование выбора схемы одноосного напряженного состояния в расчетах процесса гибки
- 4. При моделировании изгиба трубы моментом не учитывается упрочнение материала при изменении степени деформации при изгибе и, следовательно, напряжения текучести
- 5. Не показана допускаемая степень деформации при гибке крутоизогнутых труб на малые радиусы
- 6. Не указаны названия элементов на рисунке 40
- 7. Не приводятся экспериментальные данные, подтверждающие теоретические расчеты, приведенные на рисунках 14 и 15. Не обоснована их правильность. Экспериментальная гибка трубы с осевым сжатием выполнялась наматыванием на круглый копир, а теоретический расчет относится к изгибу моментом.
- 8. Данные опытной гибки, представленные графиками на рисунках 37, 38, следовало бы оценить на предмет соответствия теоретическим результатам.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением.

Изучены закономерности волнообразования при гибке труб с целью улучшение качества изогнутых заготовок трубопроводов, которое достигается осевым сжатием зоны деформирования в установленных пределах. Получена оценка деформированного состояния изогнутой трубы с учетом слабо выраженной волнистости стенки в области сжимающих напряжений.

Заключение. Диссертация Зайцева Алексея Ивановича «Разработка процессов гибки труб с осевым сжатием в пределах допустимого волнообразования» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи определения высоты слабо выраженных волн при изгибе трубы моментом с приложением осевого сжатия, имеющей значение для развития теории гибки труб и совершенствования производства трубопроводов машиностроительного назначения.

Решения основной и вспомогательных задач аргументированы автором диссертации. Научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых изданиях, одно из технических решений защищено патентом Российской Федерации на изобретение. Работа отвечает критериям п. 9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Зайцев Алексей Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением.

Официальный оппонент доктор технических наук, заведующий отделом стандартизации продукции АМТС Центра «Стандартизация и идентификация» Государственного научного центра Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт (ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»)

Лавриненко Юрий Андреевич

125438 Москва, Автомоторная ул., дом № 2

Тел. +7 (495) 456-45-39

Email: <u>lavrinenko52@mail.ru</u>

Докторская диссертация по специальности 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением

Подпись Ю.А. Лавриненко заверяю

