

Председателю объединенного совета Д 999.115.03
на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева»,
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный
исследовательский университет»,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»
д.т.н., профессору Голенкову В.А.

302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская, д.95

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.т.н., профессора Сосенушкина Евгения Николаевича

на диссертацию Лунина Константина Сергеевича на тему «Совершенствование производства трубопроводов на основе гибки труб с продольным сжатием», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – «Технологии и машины обработки давлением» (технические науки).

Актуальность темы диссертации. Гибка труб сопровождается слабо ограниченным формоизменением поперечных сечений. Нагружение трубной заготовки силами продольного сжатия, реализованное на современных трубогибах, позволяет улучшить показатели качества гибки, и, в конечном счете, повысить ресурс статической и усталостной прочности изделий. Определяющие соотношения напряженно-деформированного состояния вытекают из затраченной энергии на деформирование. Взаимосвязь принципов устойчивого равновесия и минимума полной потенциальной энергии, позволяет избежать определения последней в пользу применения аппарата статики, гораздо более компактного и известного инженерам, по общепринятым методикам расчета напряжений. Расширение области применения инженерного подхода, связанное с использованием в расчетах деформированного состояния изогнутой трубы, является актуальной задачей,

решение которой будет содействовать внедрению подобных математических моделей в практику производства.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка. Текст диссертации изложен на 113 страницах машинописного текста, иллюстрирован 39 рисунками, содержит 4 таблицы. Библиографический список включает 54 наименования.

По своему содержанию, объему и оформлению диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям.

В введении обоснована актуальность темы, приведены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость, а также основные положения, выносимые автором на защиту.

В разделе 1 содержится аналитический обзор исследований операции гибки труб по различным схемам. Основная проблема трубогибочного производства – приобретаемая при гибке овальность поперечных сечений, снижающая усталостную прочность трубопровода. Специалисты давно пришли к выводу, что разрушение, показанное на рис. 3 стр. 11 диссертации, вызвано циклическими изменениями внутреннего давления рабочей среды. Трещины возникают в том месте, где повышение давления приводит к уменьшению кривизны овала и растягивающим окружным напряжениям на внутренней поверхности стенки.

Наложением на трубную заготовку осевого сжатия достигается эффект смещения нейтральной линии деформаций относительно оси трубы, которая оказывается в области сжатия. Область растягивающих деформаций уменьшается, как и утонение стенки.

Отмечается общность используемых подходов к расчету формоизменения сечений, состоящая в аппроксимации радиальных и окружных перемещений функциями с неизвестными параметрами и вычислении их значений из условия минимума работы внутренних и внешних сил.

Однако по принципу Кастильяно состоянию статического равновесия соответствует минимальное значение потенциальной энергии системы деформирования, а значит, овальность можно определить (при той же аппроксимации) из уравнений равновесия. Поскольку параметры функций перемещений, присутствующие в уравнениях в неявном виде, неизвестны, возможность традиционного вывода расчетных формул исключается, но из неполной системы уравнений статики (пренебрегая мало значащими), иначе говоря, выборочных уравнений, можно найти численное решение.

Этот подход реализован **в разделе 2**, где рассматриваются принципиальные положения расчета уменьшения высоты сечений ΔH на примере модели идеального изгиба трубы моментом при свободном формоизменении сечений. Особенность разрабатываемой методики расчета связана с применением неполной системы уравнений равновесия, иначе говоря, выборочных уравнений. Предполагается, что найденное таким образом изменение высоты сечений трубы ΔH должно быть близким к его вариационной оценке. Автор применил аппроксимацию овальности двумя и тремя членами тригонометрического ряда Фурье с неизвестными коэффициентами и соответственно два или три уравнения равновесия моментов внутренних сил, действующих в выделенном элементе изогнутой трубы. Т.е. проведено аналитическое моделирование напряженно-деформированного состояния от аппроксимации перемещений до вывода системы разрешающих уравнений статики и ее численное решение относительно коэффициентов ряда Фурье. Расчеты овальности оказались близкими к опытным данным независимых исследователей (рис.2 стр. 8 автореферата).

В разделе 3 рассматривается формоизменение сечений изгибаемой трубы с фиксированной шириной сечений, с которым согласуется принятая функция перемещений u_r . При стесненном изгибе силы P_1 и P_2 в противолежащих точках сечения (см. рис. 21 стр.62 диссертации) велики как и их влияние на равновесие моментов напряжений. Поэтому в поле

перемещений u_α введены неизвестные параметры c_2 и c_3 , регулирующие эти силы. Вместе с параметром $c_1=0,25\Delta H$, входящим в функцию u_r радиального перемещения точек средней линии сечения (39) (стр. 63 диссертации), а также относительным удлинением ε_0 оси трубы, в полученной статически определимой системе из четырех разрешающих условий равновесия содержится столько же и неизвестных.

В результате исследований свободного и стесненного изгиба моментом подтверждена пригодность предложенного подхода к расчету слабо ограниченного формоизменения сечений, отработана аппроксимация неизвестных перемещений и система определенных интегралов, выражающих компоненты (силы и моменты) условий равновесия.

В разделе 4 анализируется схема гибки с наложением продольной сжимающей силы N_0 , которая вызывает значительное отрицательное удлинение оси трубы ε_0 , содержащееся в равенстве равнодействующей σ_φ значению N_0 . Также в схему введена поперечная сила Q , действующая на трубу, при гибке наматыванием на круглый копир (рис.30 стр. 90 диссертации). Расчеты показывают, что с увеличением силы N_0 уменьшается овализация сечений, вплоть до получения неизменной высоты сечений, т.е. $\Delta H = 0$ (рис. 25 стр. 83).

В эксперименте осевое сжатие изгибаемой трубы обеспечивали с помощью специально сконструированного гибкого дорна. Он состоит из дисков, нанизанных на стальной трос и опирающихся на внутреннюю вогнуто-выпуклую поверхность изгибаемой трубы. Будучи закреплен в упорах, установленных на торцах заготовки, трос натягивается при гибке трубы, создавая в ней продольное сжатие силой, равной его натяжению. Значение этой силы неизвестно, но изменение сечений по высоте ΔH уменьшилось в два раза.

В разделе 5 предложен способ косвенного учета пружинения на основе сопоставления поступательного перемещения наматываемой трубы с углом поворота копира и вычисления укорочения оси трубы, вызванного

продольным сжатием. По данным вычисления корректируется угол поворота копира. Практически все трубогибочные станки снабжены системами ЧПУ, которые предусматривают возможность коррекции перемещений стандартными средствами. На этот способ автором получен патент РФ.

Объем автореферата 16 стр., включая 8 рис. и список опубликованных работ из 10 наименований. Структура и содержание автореферата идентичны структуре и содержанию диссертации.

Научная новизна работы:

- выполнен инженерный анализ деформированного состояния изогнутых труб, что стало возможным благодаря выбору разрешающих уравнений статики, связанных сильной корреляцией со свободным или стесненным по ширине формоизменением сечений и его адекватной аппроксимации;

- определена предельная сила продольного сжатия трубы в зависимости от угла и радиуса гибки, превышение которой порождает пластические деформации обратного знака в окрестностях замка копира.

Теоретическая значимость работы: установлена возможность аналитической оценки изменения формы сечений изогнутой трубы, на основе неполной системы уравнений равновесия, компоненты которых – внутренние силы и моменты связаны с параметрами и условиями формоизменения.

Практическая ценность работы заключается в количественной оценке овальности сечений и утонения стенки труб, изогнутых по круглому копиру с одновременным приложением силы осевого сжатия, и ее предельно допустимых значений, а также в инженерной методике двухэтапного расчета высоты сечений при гибке охватывающим инструментом, выполняемого в два этапа:

- с увеличивающейся шириной сечений на первом этапе и фиксированной – на втором, после ликвидации зазора инструмента относительно трубы;

- с одновременным продольным сжатием или без такового.

Положения, полученные лично автором и выносимые на защиту:

- математические модели свободного и стесненного формоизменения сечений изгибающей трубы, включая аппроксимирующие функции и выборочные уравнения равновесия;
- математическая модель изгиба трубы по круглому копиру с приложением толкающей силы и предлагаемое ограничение ее предельных значений;
- рассчитанные размеры сечений изогнутой трубы с вычислением неизвестных параметров аппроксимации, удовлетворяющих разрешающим уравнениям, методом подбора в программе MathCAD.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, и их достоверность

подтверждается корректностью постановки задач, использованием современных методов исследований, корректной формулировкой начальных и граничных условий процесса и обоснованием допущений, обстоятельным подходом к выполнению анализа результатов и, как следствие, согласованием результатов анализа процесса гибки труб различными методами и их проверкой экспериментальными средствами.

Достоверность **вывода 1** основана на математическом моделировании и анализе формоизменения трубы, изгибающей моментом. Неизвестные параметры деформированного состояния определяли подбором из неполной системы уравнений равновесия, исходя из достаточности для приемлемого сближения результатов расчета с данными эксперимента. Установлено, что достаточно двух при свободном формоизменении сечений и четырех – при стесненном по ширине.

Обоснованность **вывода 2** базируется на аппроксимации поля радиальных перемещений подходящей функцией, параметры которой варьировались, с целью соблюдения условий равновесия с приемлемой точностью.

Состоятельность **вывода 3** подтверждается установленным экспериментами независимых исследователей фактом, что фиксация исходной ширины сечений, с которой согласуется принятая функция u_r , минимизирует уменьшение их высоты ΔH .

Вывод 4 обоснован, т.к. уточненная схема гибки труб учитывает касательные напряжения, приращения которых в направлении оси трубы при наличии продольной силы становятся существенным фактором, препятствующим уменьшению высоты сечений.

Вывод 5 устанавливает диапазон изменения продольной силы сжатия, прикладываемой к трубе при гибке по круглому копиру, что позволит во многих случаях отказаться от наполнителей, поддерживающих стенку трубы изнутри.

Вывод 6, основанный на решении приближенных уравнений статики с принятием допущения о сосредоточенной реакции копира, устанавливает предельные значения продольных сжимающих сил, чтобы избежать реверсивных пластических деформаций, искажающих окончательную форму изделия.

Достоверность **вывода 7** основана на проведенной автором экспериментальной гибке труб по схеме наматывания на копир с обеспечением продольного сжатия заготовки с помощью гибкого дорна, состоящего из металлических дисков, соединенных эксцентрично расположенным тросом, которые не препятствовали уменьшению высоты сечений. Результаты экспериментов подтвердили, что по сравнению с обычной гибкой, соотношение деформаций растяжения и сжатия материального волокна существенно изменилось в пользу последних, улучшились показатели утонения стенки и овальности сечений. Разработанная конструкция дорна рекомендуется для применения при одноугловой гибки труб на обычном оборудовании.

Вывод 8 достоверен, т.к. устанавливает повышение пространственной точности изделий за счет двух факторов: уменьшения пружинения и

адаптации к разбросу исходных размеров и механических свойств заготовок. Автором предложен способ управления гибкой, защищенный патентом РФ, который предусматривает коррекцию угла поворота копира в зависимости от фактического удлинения оси изгибающего участка трубы.

Замечания по работе:

1. Система уравнений (41) на стр. 64 диссертации и уравнения в автореферате на стр 7. содержат приращение по ϕ в виде дифференциала $d\phi$, который стоит перед знаком интеграла и в дальнейшем никак не учитывается. Если ϕ – малый параметр, который не изменяется, то его нужно было ввести в качестве малой постоянной величины ϕ_0 или $\Delta\phi$. Другими словами запись не соответствует общепринятым математическим обозначениям и вызывает лишние вопросы.

2. Функция радиальных перемещений представляется в виде разложения в ряд Фурье по косинусам, однако обоснование чётности функции в диссертации отсутствует, также нет обоснования сходимости этого ряда.

3. Необходимо уточнить, какая система координат используется: два угла и радиус – это сферическая система координат. При переходе к сферической системе координат $dxdydz = |J|d\rho d\phi d\alpha$ в явном виде отсутствует определитель матрицы Якоби $|J| = \rho^2 \cos\alpha$, также как и при переходе в полярную $dxdy = |J|d\rho d\alpha - |J| = \rho d\rho d\alpha$.

4. Стр. 7 и 9 автореферата непонятна корреляция формул радиального перемещения u_r - при разложении в ряд Фурье $u_r = r \sum c_k \cos 2k\alpha$, $k=1,2$ и используемая далее

$$u_r = 0,25\Delta H (\sin \alpha + 2 \sin^2 \alpha + \sin^3 \alpha);$$

при $\alpha=0$ для функции на стр.7 $u_r \neq 0$, для функции на стр. 9 $u_r = 0$;

при $\alpha=\pi/4$ для функции на стр.7 $u_r = 0$, для функции на стр. 9 $u_r \neq 0$.

5. Требует уточнения, откуда взялись нечетные степени синусов. Если выразить косинусы двойного угла через синусы одинарного, то

формула радиального перемещения будет другой
 $u_r = r[c_1(1 - 2\sin^2 \alpha) + c_2(1 - 4\sin^2 \alpha + 4\sin^4 \alpha)]$, а коэффициенты ряда Фурье
 $c_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\alpha) \cos k \alpha d\alpha$.

6. Отсутствие нумерации формул в автореферате, усложняет его анализ.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.02.09 – «Технологии и машины обработки давлением». Материалы диссертации соответствуют области исследований п. 1 Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки; п.5 Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости штамповочного инструмента.

Заключение. Диссертация Лунина Константина Сергеевича на тему «Совершенствование производства трубопроводов на основе гибки труб с продольным сжатием», является самостоятельной и логически завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится полученное автором диссертации самостоятельно решение задачи по разработке гибридного подхода для расчета овальности сечения изгибаемых труб по схеме наматывания на круглый копир, включающего аналитическое моделирование напряженно-деформированного состояния от аппроксимации перемещений до вывода системы разрешающих уравнений статики и ее численное решение относительно коэффициентов ряда Фурье, отработана аппроксимация неизвестных перемещений и система определенных интегралов, выражающих компоненты (силы и моменты) условий равновесия. Предложенное решение имеет существенное значение для теории обработки металлов давлением, т.к. расширяет область применения инженерного подхода для расчетов деформированного состояния изогнутой трубы, что будет содействовать их внедрению в практику производства.

Работа отвечает требованиям пункта 9 Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Лунин Константин Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением.

Официальный оппонент:

доктор технических наук,
профессор кафедры «Системы
пластического деформирования»
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Сосенушкин
Евгений Николаевич

23.11.17

127055, г. Москва, Вадковский пер., 3-А
тел. +7-499-972-95-27
E-mail: sen@stankin.ru

