

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОВКИ ОТВОДОВ ХОЛОДНОГО ГНУТЬЯ, ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

Шабалов И.П., Великоднев В.Я., Котова И.С., Каленский В.С. (ООО «Трубные
инновационные технологии, г. Москва, Россия)
Тел. +7(926)001-10-13; E-mail: v.kalenskiy@gmail.com

Abstract Taps cold bending play an important role in the construction of pipelines allowing to optimize the pipeline route, reduce the amount of excavation, etc. Getting the possibility of manufacturing of taps cold bending with a smaller radius is very attractive especially for main pipelines, laid in complex geological conditions. But to study the feasibility of the stress-strain state of the metal pipe is necessary to examine in detail the manufacture of taps, to identify the critical factors limiting the manufacturing process. The purpose of research is mathematical modeling of stress-strain state of the metal pipe in the manufacturing process of the removal of the cold bending of pipes with high deformation capacity.

Key words: Pipe, bend, pipeline, cold, finite element model, FEM, CAD.

Введение Отводы холодного гнутья выполняют важную функцию при строительстве магистральных трубопроводов позволяя оптимизировать трассу трубопровода, уменьшить объемы земляных работ и т.д. Но действующий ГОСТ 24950-81 регламентирует радиус для труб диаметром 1420 мм ограничивается на 60 м [1]. Это соответствует уровню деформации в трубе порядка 1,25 % [2]. Получение возможности изготовления отводов холодного гнутья с меньшим радиусом весьма привлекательно особенно для магистральных трубопроводов, прокладываемых в сложных геологических условиях. В связи с освоением в производстве труб с увеличенной деформационной способностью характеризующиеся равномерным удлинением не менее 8%, и высоким значением относительного остаточного удлинения, уменьшение радиуса изгиба отвода позволит на стандартной трубе получить отвод с большим конечным углом. Но для изучения возможности реализации этого необходимо детально исследовать напряженно-деформированное состояние металла трубы при изготовлении отводов, определить критические факторы, лимитирующие процесс изготовления, такие как деформация поперечного сечения, образование гофров, величина остаточных напряжений и т.д. при этом необходимо обеспечить сохранение надежности отвода в процессе эксплуатации.

Цель исследования состоит в математическом моделировании напряженно деформированного состояния металла трубы в процессе изготовления отвода холодного гнутья из труб с повышенной деформационной способностью, определение его предельных состояний по пластичности, остаточным напряжениям и недопустимым деформациям, определении оптимального технологического режима изготовления отвода.

Расчетная модель. На рис. 1 представлена типовая схема трубогибочной машины и ее САД модель. Процесс гибки происходит по следующему технологическому процессу: установка трубы, производство первогогиба путем поднятия гибочного ложемента, разгрузка при опускании гибочного ложемента, далее происходит передвижка и повторение указанных ранее операций до достижения необходимого угла или исчерпани длины трубы. Численная модель должна учитывать геометрию гибочной машины и реальный процесс воздействия на трубу. Особенностью построенной модели является учет нелинейного взаимодействия элементов трубогибочной машины и трубы-заготовки, кинематики движения, учитывающую реальное воздействие на трубу при единичном или

нескольких гibaх в том числе односторонний характер контакта оболочки трубы с рабочими элементами трубогиба, что позволяет определить остаточный угол гiba после разгрузки машины. Модель материала трубы-заготовки задается с использованием реальных свойств материала трубы К60 для учета упрочнения деформированного металла.

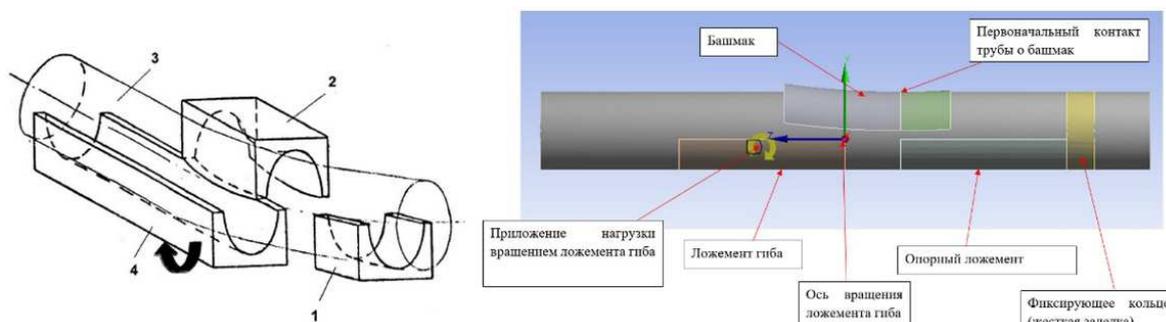


Рис. 1. Типовая схема трубогибочной машины (слева, 1 – фиксирующий ложемент, 2 – формирующее лекало «башмак», 3 – труба-заготовка, 4 – гибочный ложемент) и твердотельная расчетная модель (справа)

Основные результаты анализа. Для надежной работы отвода в составе трубопровода ведущее значение имеют уровень остаточных напряжений, величина деформаций, изменение геометрической формы и состояние металла отвода [3,4]. Можно выделить следующие значимые факторы надежности отвода:

- исчерпание деформационной способности и стабильности механических характеристик металла, необходимых при эксплуатации отвода;
- образование больших отклонений геометрии, деформация поперечного сечения, образование недопустимых гофров;
- формирование высоких остаточных напряжений.

Остаточное напряженное состояние может накладывать существенные дополнительные ограничения на эксплуатационные нагрузки. Деформированное состояние и изменения формы трубы отвода влияют на возможность внутритрубной диагностики и появлению локальных деформаций трубопровода. Состояние металла отвода определяет уровень сопротивления металла процессам деформационного старения, КРН и др. При значительной деформации металла и процесса наклепа со старением может иметь место исчерпание деформационной способности.

Описание результатов. В результате расчетов получена полная напряженно-деформационная картина металла стенки отвода. Общая картина напряженного состояния отвода подтверждает результаты [5-7], но при этом нами получено детальное распределение продольных напряжений, заключающееся в определении высоких значений в нейтральной зоне (продольное сварное соединение). В том числе моделирование изготовления отвода посредством нескольких гибов вводит коррективы в деформационную картину стенки трубопровода по сравнению с чистым изгибом.

Отмечено, что вид Stress-strain диаграммы практически не влияет на деформационную картину. Есть незначительные изменения в остаточных напряжениях. Величина остаточного напряженно-деформированного состояния сильно зависит от единичного угла гiba/остаточного угла гiba.

Из-за неравномерности распределения пластических деформаций и упругого отброса поле остаточных напряжений существенно неоднородно по сечению трубы (рис. 2а, Па). В зоне планируемой нейтральной линии наблюдается рост продольных

напряжений вплоть до уровня, близкого к пределу текучести металла. Там же наблюдается резкое изменение знака продольных напряжений, что свидетельствует о большой величине касательных напряжений в стенке трубопровода в зоне сварного соединения.

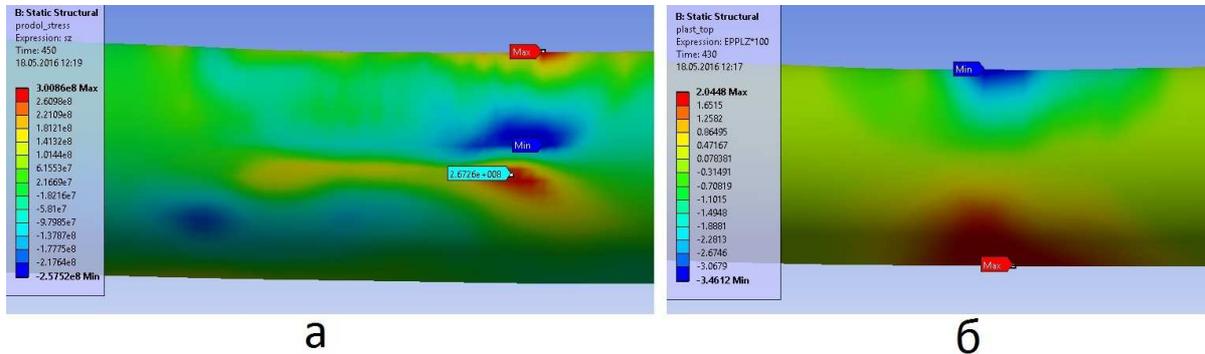


Рис. 2. Распределения продольных напряжений (а) и пластической деформации (б) в стенке отвода

Распределение продольной пластической деформации (рис. 2б, %) неравномерное из-за характера деформирования. Получена картина развития пластической деформации в стенке отвода при его пошаговом изготовлении (рис 3). Процесс накопления пластической деформации происходит в 2 этапа. 1-й этап – прирост пластической деформации до уровня, соответствующего необходимому радиусу изгиба, 2-й этап – расширение зоны пластической деформации (при сохраненном максимальном уровне). Анализ развития пластической деформации в ходе изготовления позволяет определить оптимальный режим изготовления отвода в части передвижки и единичного остаточного углагиба.

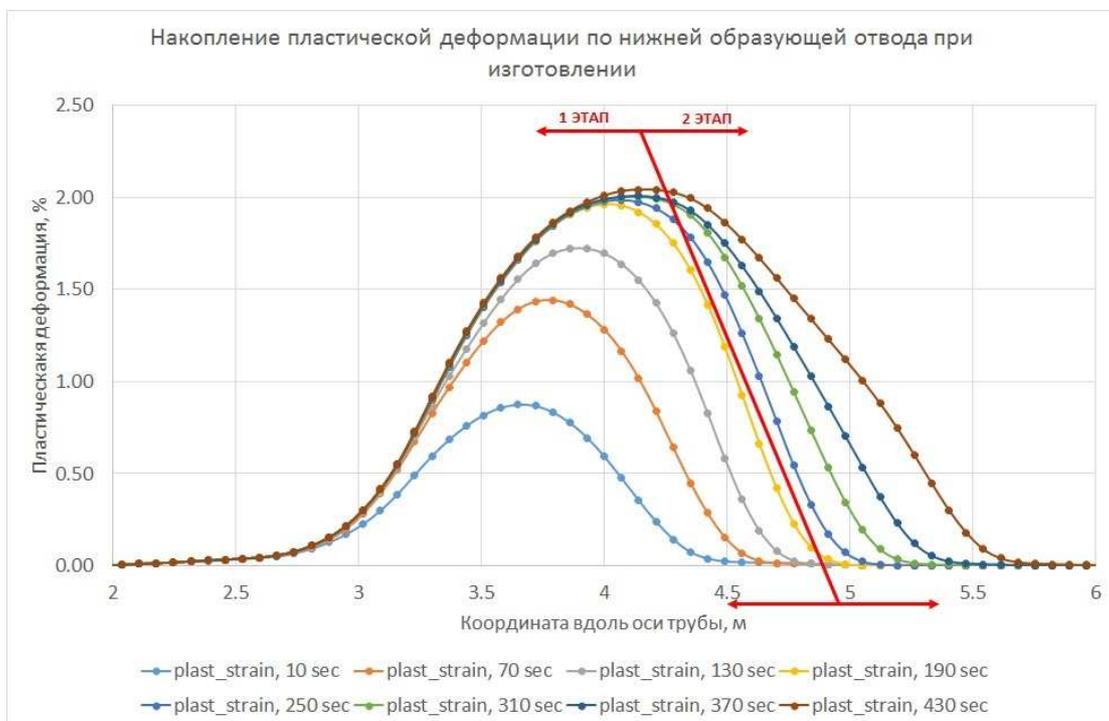


Рис. 3. накопление пластической деформации при изготовлении отвода

Заключение и выводы. Впервые определено взаимное влияние основных критериев предельных состояний и конечного угла отвода. Получена уточненная картина анализа оптимального технологического процесса изготовления отвода холодного гнутья.

В результате проведенных исследований разработана модель напряженно-деформированного состояния трубы в условиях изготовления отводов холодного гнутья в трубогибочной машине.

Выявлены основные особенности деформирования трубы 1402x21,6 К60 при больших углахгиба:

- Отмечен высокий уровень остаточных напряжений. Остаточные напряжения резко растут до 310 МПа при увеличении единичного углагиба до 0,5°. При увеличении единичного углагиба от 0,5° до 2° рост остаточных напряжений менее интенсивный и достигает уровня 360 МПа.

- Пластические деформации растут монотонно в зависимости от остаточного угла единичногогиба (до 2,3% при увеличении единичного углагиба до 2°).

- Получена картина накопления пластической деформации в стенке отвода при его изготовлении, позволяющая определить оптимальный технологический режим его производства.

Величина локальной деформации и уровень пластической деформации при угле единичногогиба до 2° на трубе 1420x21,6 К60 не являются критическими параметрами в надежной работе отвода.

Критическим фактором надежной работы отвода в составе трубопровода является высокий уровень остаточных напряжений, величины которых в зоне сварного соединения близки к пределу текучести металла (до 0,8 \cdot ст). Их должны быть учтены в расчетах при проектировании.

Список литературы 1. ГОСТ 24950-81 Отводы гнутые и вставки кривые на поворотах линейной части стальных магистральных трубопроводов. Технические условия. **2.** Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М., МГТУ им Н.Э. Баумана, 1999. – 169 с. **3.** Великоднев В.Я., Габелая Г.Р., Головин С.В., Зандберг А.С. Особенности формоизменения труб при изготовлении отводов холодного гнутья большого диаметра // Трубопроводный транспорт. №1 (13) апрель. 2008. **4.** Есиев Т.С., Войдер К.А., Глухов М.Г. Анализ влияния холодной пластической деформации, возникающей в процессе изготовления, на механические свойства основного металла и металла сварных соединений отводов холодного гнутья из спиральношовных труб // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. №1 (17) 2014. **5.** I.I. Thesi Riagusoff, Kenedi P.P., Guimarães de Souza L.F., Calas Lopes Pacheco P.M. Modeling of pipe cold bending: a finite element approach // VI national congress of mechanical engineering. **6.** Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы // Под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2007. **7.** Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С., Фотин С.В. Численный анализ пожарной опасности магистральных газопроводов // Под ред. В.Е. Селезнева. – М.: Едиториал УРСС, 2004.