

УДК 621.774.353

Разработка аналитической модели косовалковой правки бесшовных труб

Стерликов Евгений Викторович

sterlikovev@bk.ru
SPIN-код: 4523-9290

МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен процесс правки бесшовных стальных труб на косовалковых машинах с акцентом на разработку аналитической математической модели для прогнозирования остаточного прогиба. Представлен метод расчета прогиба, основанный на применении кубических сплайнов и билинейной модели упругопластического материала. Метод реализован в среде Python. Предложенный подход универсален и позволяет оценивать остаточный прогиб труб различного сортамента с произвольной начальной кривизной и заданной конфигурацией валков. Проведен расчет на примере холодной правки трубы диаметром 218 мм на десятивалковой машине. Полученные результаты могут быть применены для оптимизации режимов правки на трубопрокатных агрегатах и повышения качества трубной продукции в нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: бесшовные трубы, косовалковая правка, аналитическая математическая модель, упругопластическое деформирование, теплая правка, прогиб правки

Development of an analytical model for multi-roll straightening of seamless pipes

Sterlikov Evgeny Viktorovich

sterlikovev@bk.ru
SPIN-code: 4523-9290

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The process of straightening seamless steel pipes on multi-roll straightening machines is considered, with an emphasis on the development of an analytical mathematical model for predicting residual deflection. A method for calculating deflection is presented, based on the application of cubic splines and a bilinear model of an elastic-plastic material. The method is implemented in the Python environment. The proposed approach is universal and allows for the assessment of the residual deflection of pipes of various assortments with arbitrary initial curvature and a given roll configuration. A calculation was performed for the cold straightening of a pipe with a diameter of 218 mm on a ten-roll machine. The obtained results can be applied to optimize straightening regimes on pipe rolling mills and improve the quality of tubular products in the oil and gas industry.

Keywords: seamless pipes, multi-roll straightening, analytical mathematical model, elastic-plastic deformation, warm straightening, straightening deflection

Введение. Нефтегазовая промышленность является основой современной энергетики и важным поставщиком сырья. Бесшовные стальные трубы – бу-

рильные, обсадные и насосно-компрессорные — используются при бурении, креплении скважин и транспортировке углеводородов. Их эксплуатация в агрессивных средах и при высоких давлениях предъявляет строгие требования к механическим свойствам, герметичности, коррозионной стойкости и геометрической точности [1].

Освоение сложных месторождений стимулирует применение высокопрочных сталей (Q125, Q135 по API 5CT) для повышения надежности и снижения металлоемкости. Однако производство и правка таких труб технологически сложны из-за чувствительности материала. Согласно ГОСТ ISO 13680–2016 [3], мартенситные стали допускают холодную правку с последующим отжигом или теплую ротационную правку ($\geq 400^\circ\text{C}$); нарушение условий приводит к наклепу, остаточным напряжениям и снижению надежности.

Необходимость тепловой правки труб на ТПА 73-273 АО «ВМЗ» обусловлена риском образования остаточных напряжений, однако существующая практика не позволяет оперативно переналаживать оборудование под новые сортаменты. Сложность разработки эффективных режимов связана с комплексным характером процесса: косовалковая правка включает пространственное изгибание трубы с одновременным вращением и овализацией, а теплые режимы усугубляют изменение механических свойств металла [4]. Анализ литературы показывает, что существующие методики не учитывают специфики тепловой правки высокопрочных труб и недостаточно описывают закономерности процесса с учетом реологических свойств материала [5–8].

Объектом исследования выступает процесс косовалковой правки труб, а предметом — закономерности формирования остаточного прогиба трубы, описываемые моделью, ее точность и ограничения. Актуальность работы обусловлена специфическими проблемами правки труб на ТПА 73-273, особенно высокопрочных, и недостатками существующих методик. Целью данного исследования является реализация подхода к расчету холодной правки труб.

Материалы и методы. Для разработки методики определения оптимальных параметров тепловой правки выбран метод расчета остаточного прогиба, апробированный Ma L. [9] для многовалковой холодной правки труб. Метод, использующий кубические сплайны для описания изгиба и теорию упругопластического деформирования, позволяет прогнозировать остаточную кривизну после многократных изгибов. В настоящей работе проводится первоначальная валидация на процессе холодной правки, что создает основу для последующей адаптации метода к условиям тепловой правки с учетом реологических особенностей металла и температурных полей.

Результаты. Выбранная методика расчета остаточного прогиба трубы, базируется на применении кубических сплайн-функций для аппроксимации траектории изгиба трубы. Узлами интерполяции служат характеристические точки контакта трубы с рабочими валками.

На основе полученной функции прогиба для каждого участка трубы вычисляется локальная кривизна как вторая производная функции прогиба по

осевой координате. Таким образом, определяется кривизна, которую труба приобретает в процессе правки.

Для расчета остаточной кривизны применяется билинейная модель упругопластического материала. Она описывает поведение материала через два участка: линейно-упругий до предела упругости и упругопластический с учетом упрочнения после его достижения.

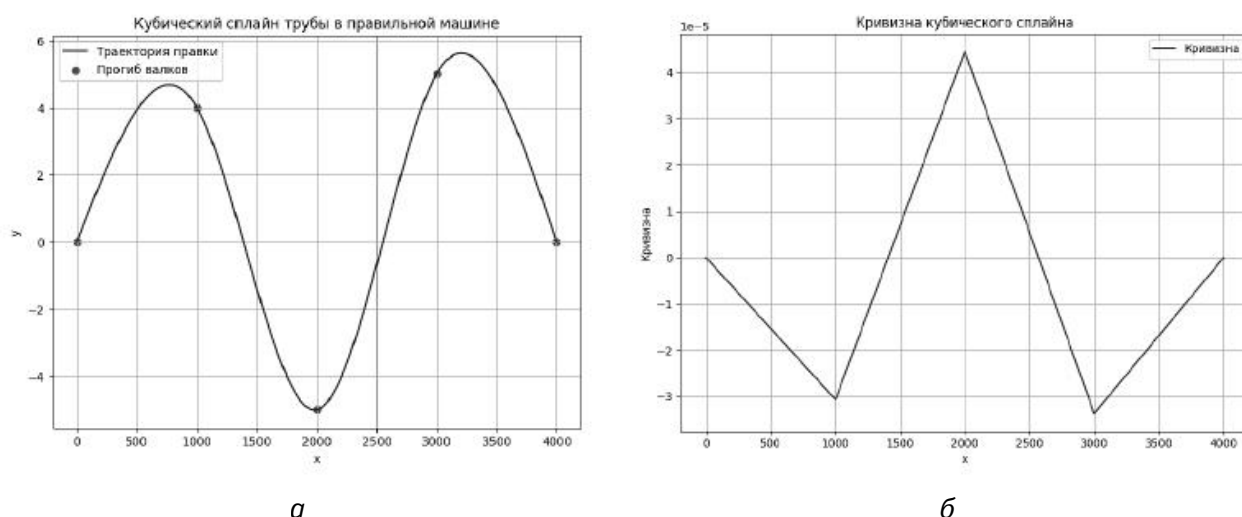


Рис. 1. Результат аппроксимации настроек правильной машины:
а — кубический сплайн; б — кривизна кубического сплайна

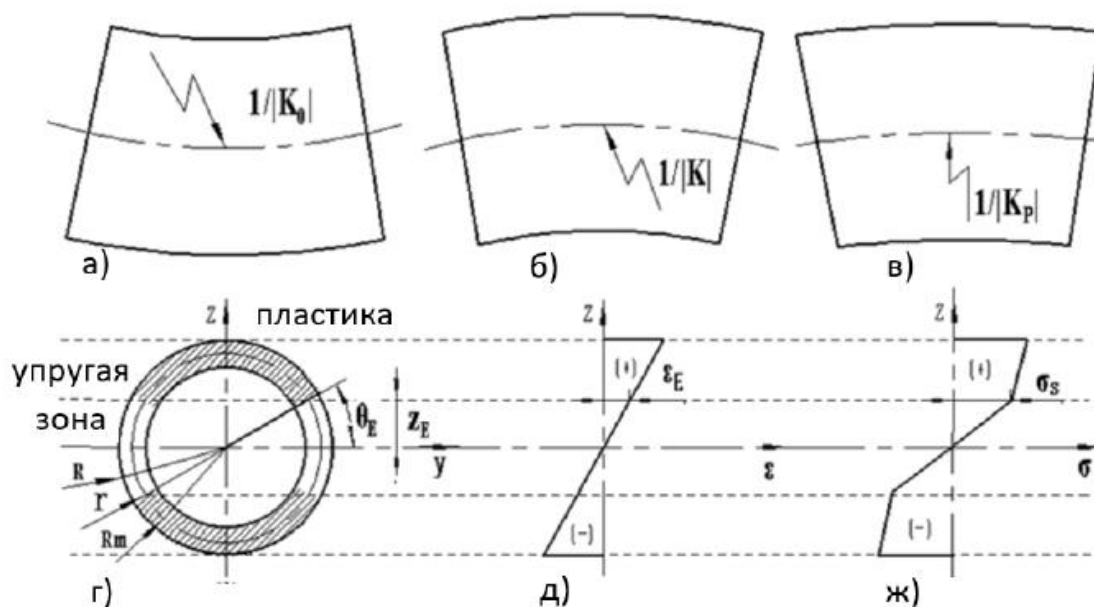


Рис. 2. Схема расчета упругопластического изгиба:

а — сходный прогиб; б — прогиб правки; в — остаточный прогиб; г — сечение трубы;
д — деформации; ж — напряжения

На рис. 2 показана схема упругопластического изгиба. Граница между упругой и пластической зоной находится на координате Z_E , где материал достигает предела текучести:

$$Z_E = \frac{\sigma_s}{E(K-K_0)}. \quad (1)$$

На следующем этапе определяется изгибающий момент, который рассчитывается с учетом упругой и пластической областей материала:

$$M = \int_A \sigma z dA = \int_0^{Z_E} E z^2 (K - K_0) dA + \int_{Z_E}^R (D\varepsilon + \sigma_0) z dA. \quad (2)$$

На финальном этапе происходит расчет кривизны после снятия нагрузки K_p

$$K_p = K - \frac{M}{EI}, \quad (3)$$

где K — приложенная кривизна при изгибе; M — изгибающий момент; E — модуль упругости; I — момент инерции сечения.

Таким образом остаточная кривизна зависит от приложенного изгибающего момента и жесткости сечения.

Для расчета прогиба всей трубы с учетом сложной кривизны правки многовалковой машины труба разбивается на сегменты длиной, равной половине длины винтовой линии. Таким образом для одного сегмента попеременно рассчитывается прямой и обратный изгиб по мере продвижения трубы по оси правки.

Далее расчет кривизны трубы итерируется по перемещению в правильной машине. Остаточная кривизна с прошлой итерации используется как начальная кривизна на текущем шаге. На рис. 3 показана расчетная схема вычисления остаточного прогиба трубы.



Рис. 3. Расчетная схема остаточного прогиба трубы

Обсуждение. Данная методика была реализована на языке программирования Python и унифицирована под любое количество валков и кривизну трубы.

Для демонстрации работы модели была осуществлен расчет правки трубы диаметром 218 мм и длиной 10 м из стали 32Г2 на десятивалковой машине. Исходный прогиб трубы составлял 30 мм. В результате проведенных расчетов подобраны режимы правки, при которых прогиб будет достигать 2 мм. На рис. 5 приведена визуализация процесса расчета и распределения прогиба вдоль трубы.

При анализе полученных результатов и оценке применимости модели были также выявлены следующие основные остающиеся допущения, влияющие на точность расчета:

Использование билинейной модели упругопластического материала, применяемая при холодной деформации.

Не учитывается влияние скорости деформации и температуры на механические свойства материала.

Некорректный расчет концевых участков трубы.

Не учитывается овализации трубы.

Применение схемы чистого изгиба нагружение моментом.

Расчет прогиба трубы и ее кривизны в одной плоскости.

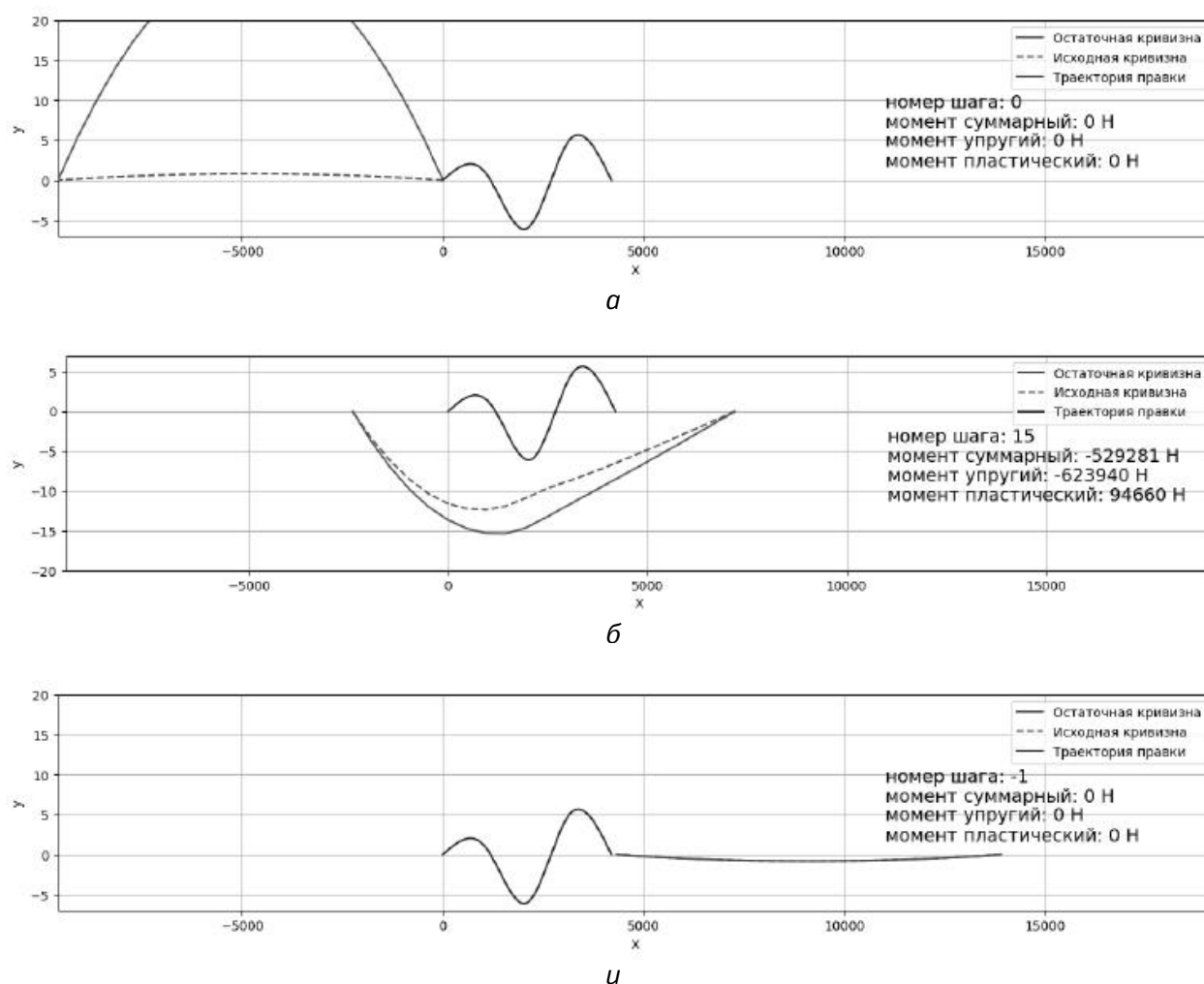


Рис. 5. Форма трубы и момент правки на различных стадиях процесса:
а — начальный прогиб; б — прогиб в процессе правки; в — остаточный прогиб

Закключение. В рамках настоящей работы была реализована и автоматизирована аналитическая модель процесса правки бесшовных труб на косовальковых машинах. Данная модель обладает высокой скоростью расчета и универсальностью, позволяет проводить оценку остаточного прогиба для

различного количества валков и произвольной начальной кривизны трубы с оптимизацией режимов правки.

Для подтверждения возможностей применимости данного подхода, необходимы дополнительные экспериментальные исследования на трубах с различными геометрическими параметрами и механическими свойствами.

Перспективы дальнейшего исследования связаны с развитием и уточнением созданной модели для ее применения в условиях тепловой правки высокопрочных труб. Ключевой задачей является замена текущей модели материала на реологическую модель, адекватно описывающую поведение сталей Q125 и Q135 при температурах тепловой правки (400–550 °C).

Список источников

- [1] Филиппов А.Г., Ерехинский Б.А., Крылов П.В., Попов К.А. Применение высокотехнологичных бесшовных нарезных труб для решения текущих и перспективных задач добычи газа в ПАО «Газпром». *Территория Нефтегаз*, 2018, № 5, с. 50–57.
- [2] Федоров А.С., Карасев В.С., Алексеева Е.Л., Альхименко А.А., Шапошников Н.О. Проблемы подбора коррозионностойких сталей и сплавов в нефтегазовой отрасли под условия эксплуатации. *Известия вузов. Черная металлургия*, 2024, т. 67, № 3, с. 340–350, <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-340-350>
- [3] ГОСТ ISO 13680–2016. *Трубы бесшовные обсадные, насосно-компрессорные и трубные заготовки для муфт из коррозионностойких высоколегированных сталей и сплавов для нефтяной и газовой промышленности. Технические условия*. Москва, Стандартинформ, 2017, 63 с.
- [4] Янушкевич Ж.Ч., Луговская А.С., Беляков А.Н. Влияние тепловой деформации на микроструктуру и прочность аустенитных коррозионностойких сталей в широком интервале температур испытаний. *XVII Междунар. науч.-техн. Уральская школа-семинар металлосведов-молодых ученых: сб. тр.* Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2016, ч. 2, с. 127–131.
- [5] Брижан А.И., Бодров Ю.В., Грехов А.И. и др. *Способ настройки косовалковой правильной машины при правке труб с температурой 500–700 °C*. Патент № 2406582 С2 РФ, МПК B21D 3/04 (2006.01), 2010, бюл. № 35, 6 с.
- [6] Yin J., Zhao J., Wang S., Wan X., Li Y. Principle of Multi-roller Straightening Process and Quantitative Resolutions of Straightening Strategies. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2014, vol. 21, no. 9, pp. 823–829.
- [7] Huang Q., Huang Q., Zhang W. Study on the straightening quality of steel pipe based on the computer numerical simulation technology. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*, Harbin, China, Harbin, IEEE, 2011, pp. 567–570. <https://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6023165>
- [8] Dvorkin E.N., Medina F.M. A Simplified Finite Element Simulation for Straightening Process of Thin-Walled Tube. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 274, no. 1, art. no. 012150. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/274/1/012150>
- [9] Ma L., Liu Z., Ma L., Du Y. Analysis of eleven cross-roll straightening process of steel tube based on cubic spline function and continuous bending elastic-plastic theory. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, pp. 3235–3245. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06431-2>

A7

**Технологии сварки
и диагностики**

