

УДК 621.774.353

Прогнозирование образования внутренней граненности бесшовных труб на редуционно-растяжных станах

Туйчиев Сиевущбек Чули угли^{1,2} siyovusht@gmail.com¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² АО «ВМЗ», Выкса, Россия

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию образования внутренней граненности труб при прокатке на редуционно-растяжных станах. Образование внутренней граненности связано с особенностями течения металла и представляет собой сложный процесс, который невозможно описать аналитическими зависимостями. В работе исследование течения металла при прокатке труб в редуционном стане проведено с помощью метода конечных элементов. Для повышения точности результатов в конечно-элементной модели применен произвольный лагранжево-эйлеровый (ALE) подход, в результате чего удалось установить области наибольших утолщений и исследовать развитие внутренней граненности.

Ключевые слова: бесшовная труба, редуционно-растяжной стан, внутренняя граненность труб, прокатка, метод конечных элементов

Tube inner polygonization prediction in stretch-reducing mill

Tuychiev Siyovushbek Chuli ugli^{1,2} siyovusht@gmail.com¹ BMSTU, Moscow, Russia² JSC Vyksa Steel Works, Vyksa, Russia

Abstract. Paper deals with inner polygon formation of seamless tubes in stretch reducing mill. Tube inner polygonization – tube rolling, in general, represents complex thermo-mechanical process that is hard to describe with analytical solutions. This paper analyze tube rolling through means of finite-element modeling. To enhance the accuracy of results, Arbitrary Lagrange-Eulerian formulation of mesh was applied in FE model. Tube wall thickness variation and its inner polygonization evolution was investigated.

Keywords: seamless tube production, stretch-reducing mill, tube inner polygonization, rolling, finite element method

Введение. Внутренняя граненность бесшовных труб достаточно распространенный геометрический дефект, образующийся при безоправочной прокатке труб на редуционно-растяжных станах. Геометрический дефект показан на рис. 1.

Изучению данного явления посвящено значительное число работ российских и иностранных исследователей [1–3]. Как правило, изучение данной проблемы проводится с учетом ряда допущений, которые существенно упрощают задачу. В связи с этим, на сегодняшний день нет единого мнения

о формировании величины внутренней граненности труб с учётом факторов прокатки таких как: калибровка инструмента, обжатие по диаметру, скоростной режим.

На практике для предотвращения данного геометрического дефекта увеличивают межклетевое натяжения путем изменения скоростей валков клетей редуционного стана. Например, в работе [4] показано, что на 12 клетьевом стане при прокатке трех труб с различными величинами натяжения был достигнут положительный эффект от повышения межклетевого натяжения, что было также экспериментально подтверждено при прокатке сварной трубы.

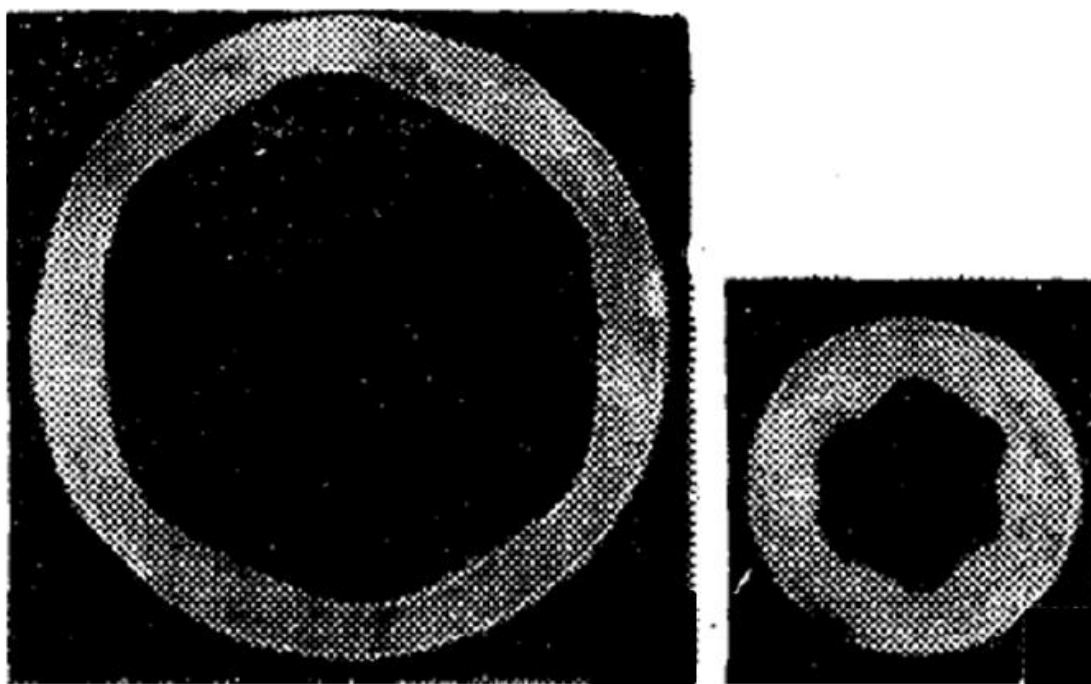


Рис. 1. Дефект внутренней граненности трубы [1]

Помимо практических подходов для исследования причин возникновения внутренней граненности, используют численные методы анализа, среди которых самым распространенным является метод конечных элементов [7]. Например, в работах [5, 6] исследование редуцирования трубы в редуционном стане проведено методом конечных элементов в среде MSC.Marc. Тем не менее, существующие численные и аналитические способы решения данной задачи не позволяют в полной мере исследовать проблему возникновения внутренней граненности труб, что связано с невозможностью учета множества факторов влияющих на появление данного дефекта в единичной модели.

В связи с этим, создание адекватной модели процесса горячего редуцирования труб является актуальной задачей.

Постановка задачи. Для оценки внутренней граненности труб используется формула [8]:

$$P = \frac{s_{bi} - s_{ai}}{s_{bi}}. \quad (1)$$

Как показано на рис. 2, приведенные значения в формуле соответствуют максимальному и минимальному значению толщин стенки трубы.

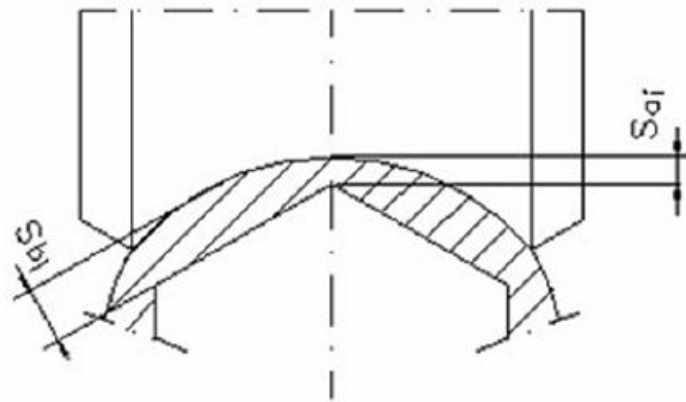


Рис. 2. Схема расчета внутренней граненности труб

Для исследования причин образования внутренней граненности трубы в трехвалковом редуционном стане была разработана трехмерная конечно-элементная модель процесса горячей прокатки. Материал трубы был задан как пластичный материал с изотропным упрочнением и кусочно-линейной аппроксимацией кривой деформационного упрочнения. Пластическая деформация описывалась критерием текучести Мизеса.

В трехвалковых редуционных станах валки каждой клетки повернуты на 60° вокруг оси прокатки относительно соседних клеток. Для оптимизации вычислительной эффективности без ущерба точности была учтена характерная трехвалковой системе шестикратная симметрия, в результате чего удалось значительно сократить размерность задачи (рис. 3). Соответствующие граничные условия симметрии были применены к срезам сектора трубы для корректного представления полной сборки. В модели валки были заданы как абсолютно жесткие тела, а также был учтен теплообмен трубы с валками и окружающей средой.

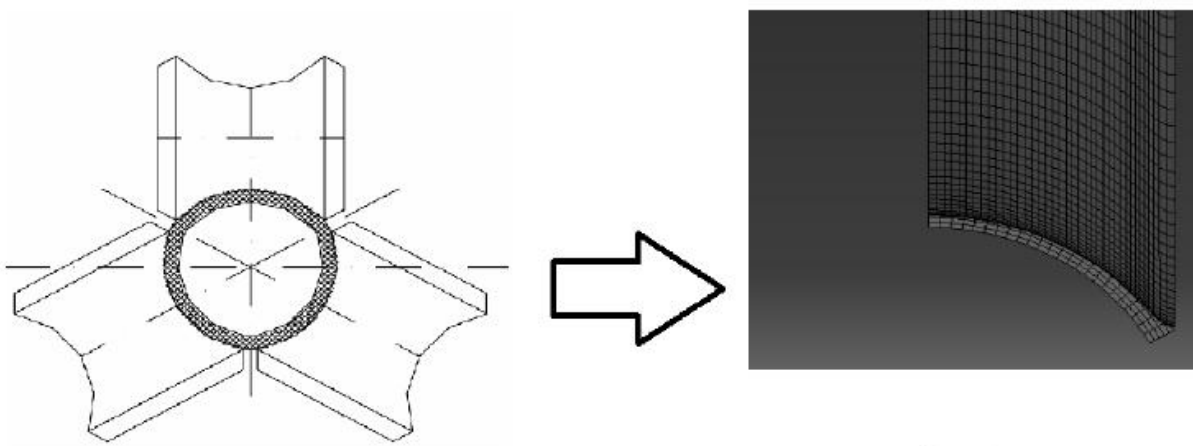


Рис. 3. КЭ модель трубы и половина валка

Контакт между валком и трубой был реализован с помощью встроенных возможностей программы. Все расчеты были проведены явным конечно-элементным решателем.

Как показывает анализ литературы [9, 10], при моделировании задач пластичности, в которых ожидаются большие (более 30 %) деформации, во избежание сильного искажения КЭ-сетки и потери точности расчета, целесообразно применять альтернативные способы описания движения сплошной среды, например, применять бессеточные методы или вместо лагранжевых элементов, которые деформируются со средой, использовать неподвижную эйлеровую сетку.

В данной работе в модели трубы была применена сетка по произвольному лагранжево-эйлеровому (ALE — Arbitrary Lagrangian-Eulerian) подходу [9]. Этот метод сочетает в себе преимущества лагранжевой и эйлеровой формулировок.

Исходная геометрия трубы была задана идеально круглым с нулевым значением внутренней граненности. Расчеты были проведены для четырех клеток редуцированного стана для изучения развития поперечной разностенности трубы и ее внутренней граненности. Температура трубы была задана равной 1000°C.

Результаты. На рис. 4 приведены изменения относительного обжатия трубы по диаметру и относительного изменения скоростей валков.

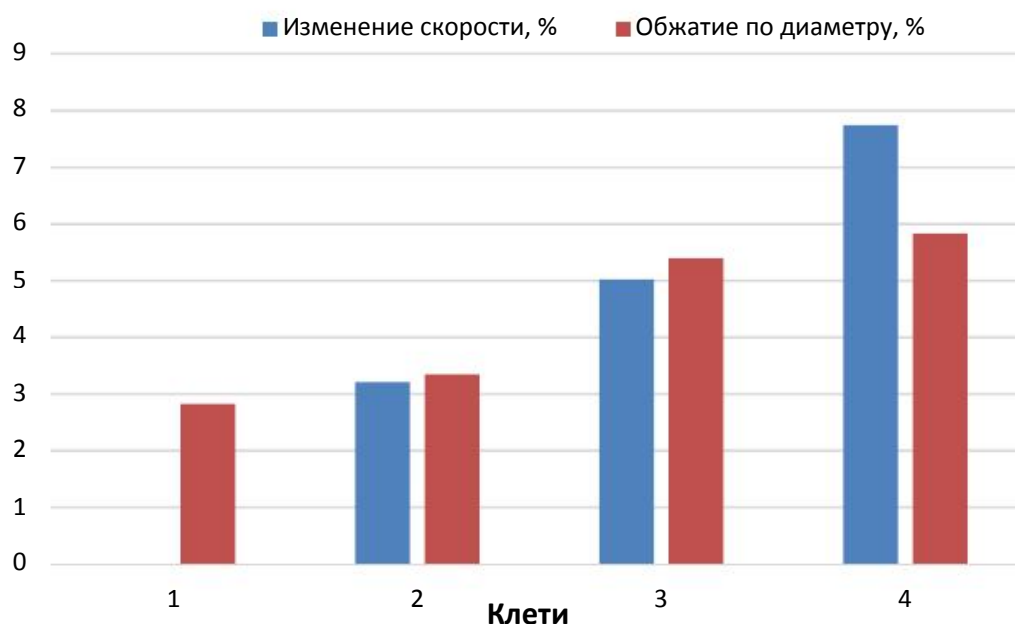


Рис. 4. Изменение скоростей и обжатий по диаметру в четырех клетях стана

На рис. 5 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в поперечном сечении очага деформации трубы полученной в ходе расчетов КЭ модели. Характер очага деформации в поперечном сечении соответствует теоретическим и экспериментальным данным [1, 2].

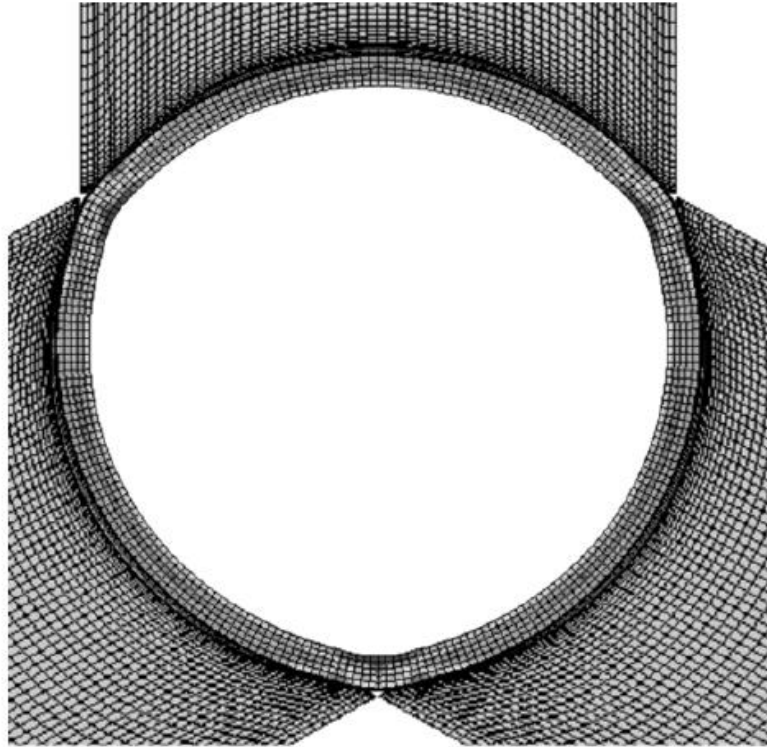


Рис. 5. Поля эквивалентных напряжений в поперечном сечении очага деформации трубы (увеличено в два раза).

На рис. 6 приведены изменения толщин стенок трубы. Углы 0° и 60° сектора трубы соответствуют вершине и выпуску калибра первой клетки показанный на рис. 3. В соответствии с расположением валков клетки, угол 0° будет находится в области в вершине калибра в первой клетке, и в области выпуска калибра во второй клетке, и т. д.

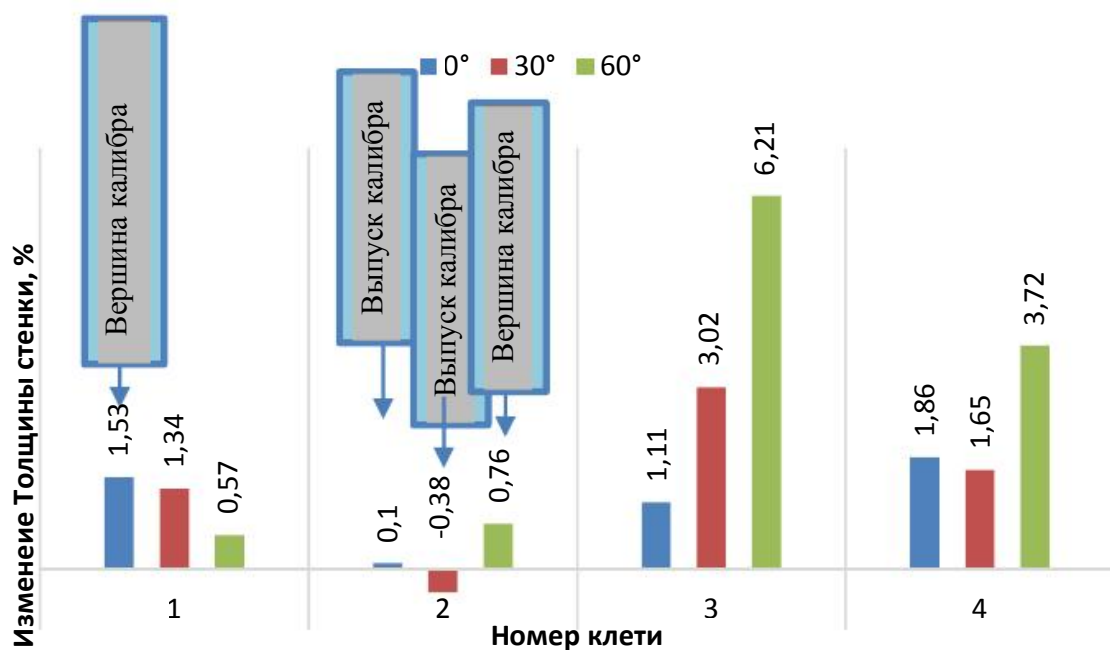


Рис. 6. Изменение толщин стенок после прокатки в характерных сечениях калибра

На основе полученных численных результатов, по формуле (1) была рассчитана внутренняя граненность трубы (рис. 7).

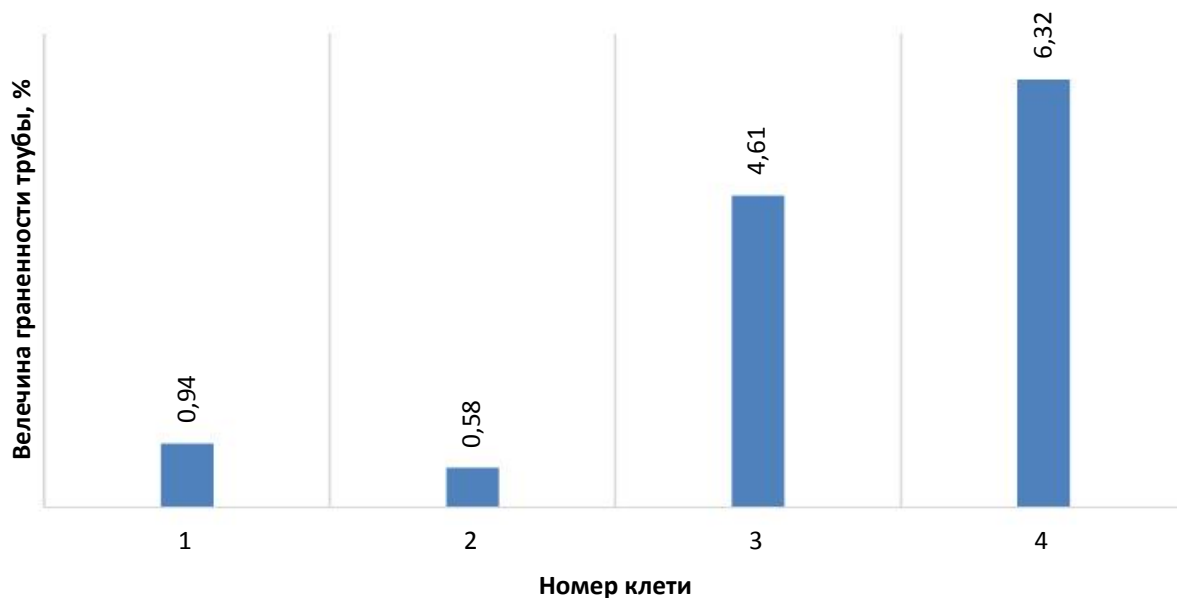


Рис. 7. Величина внутренней граненности трубы по клетям

В результате установлено, что толщина стенки в точке 60° значительно возрастает в третьей клетке и в четвертой клетке, что приводит к увеличению граненности трубы до 6,32 %. При этом в третьей клетке наибольший прирост утолщения и это соответствует выпуску калибра.

Заключение. На основе разработанной конечно-элементной модели для прогнозирования развития внутренней граненности в редуционно-растяжных станах удалось исследовать процесс с большими пластическими деформациями с минимальными искажениями сетки трубы. Результаты моделирования показали, что внутренняя граненность зарождается постепенно и нелинейно увеличивается при прокатке в непрерывной группе клетей. На развитие этого дефекта могут влиять различные сочетания факторов таких как обжатие, скорость прокатки, а также исходная граненность трубы.

Разработанная модель представляет собой инструмент для прогнозирования, позволяющий оптимизировать параметры процесса прокатки труб на редуционно-растяжном стане, что позволит найти пути повышения качества продукции и эффективности работы стана.

Список источников

- [1] Гуляев Г.И., Ившин П.Н., Ерохин И.Н., Зимин А.К., Рукобратский В.П. *Технология непрерывной безоправочной прокатки труб*. Москва, Металлургия, 1975.
- [2] Анисифоров В.П., Зельдович Л.С., Курганов В.Д., Шпигельман Р.М., Ивоботенко В.А. *Редуционные станы*. Москва, Металлургия, 1971, 256 с.

- [3] Thieven P. Untersuchungen zur Innenpolygobildung beim Streckreduzieren von Rohren. *Stahl und Eisen*, 1996, vol. 8, 119 p.
- [4] Stefanski K., Kubinski W. Diminishment of internal polygonization of tubes in hot stretch-reducing mill. *Metallurgy and Foundry Engineering*, 2010, vol. 36, no. 1. <https://doi.org/10.7494/mafe.2010.36.1.21>
- [5] Thieven P. *Experimental and numerical investigation of stretch reduction rolling of steel tubes*. Germany, TU Clausthal, 1995.
- [6] Giardini C., Bugini A., Pellegrini G. *Creep influence in a stretch reducing mill computer simulation*. Italy, University of Brescia, 1990.
- [7] Зенкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. Москва, Мир, 1975, 540 с.
- [8] Biller H. *Beitrag zum inneren Unrundwerden beim Reduzieren von Rohren*. Diss. TH Aachen, 1967.
- [9] Fertig III R.S. An accurate and efficient method for constituent-based progressive failure modeling of a woven composite. *Supplemental Proceedings: Volume 2: Materials Characterization, Computation, Modeling, and Energy*, Seattle, WA, TMS, 2010, pp. 223–230.
- [10] Shun Liu, Xiaowei Tang, Jing Li. A decoupled Arbitrary Lagrangian-Eulerian method for large deformation analysis of saturated sand. *Soils and Foundations*, 2022, vol. 62, iss. 2, art. no. 101110.

A11

Электронные технологии в машиностроении

