

9. R. K. Pattanayak, P. Manogharan, K. Balasubramaniam, and P. Rajagopa «Low frequency axisymmetric longitudinal guided waves in eccentric annular cylinders» *J. Acoust. Soc. Am.* 137 (6), p. 3253–3262
10. Чуев А.А. Моделирование процесса продольной прокатки с целью повышения точности труб / А.А. Чуев // *Обработка материалов давлением*. – 2011. – № 3 (28) – С. 59–65.
11. Столетний М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт – М.: Металлургия, 1975. – 239 с.
12. Чекмарев А.П. Основы прокатки труб в круглых калибрах / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин – М.: Металлургия, 1962. – 222 с.
13. А.А. Корсаков, Совершенствование технологии винтовой прокатки непрерывнолитой заготовки с целью уменьшения диаметра черновой трубы. Автореферат диссертации на звание кандидата технических наук, ЮГУ, 2015.
14. Ханин М.И. Режимы прошивки, обеспечивающие снижение продольной разностенности труб на агрегатах с короткооправочными станами / М.И. Ханин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 49–50.
15. Ханин М.И. Технология прокатки труб повышенной точности на агрегате с автоматом с использованием нестационарных режимов деформации при прошивке / М.И. Ханин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8–9. – С. 361–369.

пост. 04.09.2017

В.П. СОКУРЕНКО д.т.н., внештатный научный сотрудник ГП "НИТИ"
Трубный институт им. Я.Ю. Осады, г. Днепр
И.В. МАРКЕВИЧ к.т.н., доцент, ivanmiv81@gmail.com
Национальная Металлургическая академия Украины, г. Днепр

Экспериментальное исследование и математическая модель изменения поперечной разностенности в процессе холодной прокатки труб высокой точности

Приведены результаты экспериментальных исследований и предложена математическая модель описания изменения по длине рабочего конуса поперечной разностенности труб с малой исходным ее значением. В математической модели используются коэффициенты полученные по результатам обработки экспериментальных данных. Это позволяет использовать модель для проектирования параметров процесса прокатки труб высокой точности, условий деформирования и исследования марки стали.

In the given work authors presents the results of experimental research and suggests a mathematical model for describing the wall thickness variation along the length of the working cone of the tubes with a small initial value of wall thickness variation. The coefficients obtained from the processing of the experimental data are used in the mathematical model. This allows using the model for designing the parameters of the process of rolling high-precision tubes, deformation conditions and investigated the steel grade.

Постановка проблемы

При производстве труб с высокой точностью стоит вопрос расчета точности труб прокатываемых по существующим маршрутам прокатки. Недостаточно освещено влияние современных многозонных калибровок на изменение разностенности во время прокатки.

Холоднодеформированные трубы используются в различных изделиях ответственного назначения. Холодную прокатку труб на станах ХПП и др. используют для получения труб с повышенным качеством по геометрии, для получения требуемых механических свойств и структур, а также для производства труб малых диаметров.

В суммарном очаге деформации, полученном за ход клетки, который называется рабочим конусом (рис. 1), осуществляется редуцирование трубы (участок I_p), обжатие по толщине стенки (участок I_0), калибровка стенки (участок предотделки I_{np}), калибровка диаметра (участок $I_{к.пов.}$) [1].

Один цикл прокатки осуществляется за двойной ход клетки, который включает прямой и обратный ход. Обычно перед прямым ходом осуществляют подачу m (участок зева подачи $I_{з.п.}$), а перед обратным ходом — кантовку трубы (участок зева поворота $I_{з.пов.}$).

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ исследований [2] показал, что в процессе холодной прокатки труб поперечная разностенность труб заготовок уменьшается. Автор этой работы описывают процесс изменения поперечной следующей математической моделью

$$R_{\Sigma} = R_0 \left(0,1 + 0,9 \frac{d}{d_0} \right) + R_n, \quad (1)$$

где R_0 и R_n — соответственно входящая и наведенная разностенность в %; d_0 та d — входящие и финальное значение диаметра.

Такая математическая модель представлена для условий холодной прокатки труб из углеродистых сталей. Для таких условий, автор связывает процесс уменьшения поперечной разностенности в основном с обжатием по диаметру и учитывает влияние наведенной разностенности как статистическую величину. Данное исследование базируется на том, что при производстве холоднодеформированных стальных труб стремятся осуществлять большое обжатия по диаметру.

Известна математическая модель, представленная в работе [4].

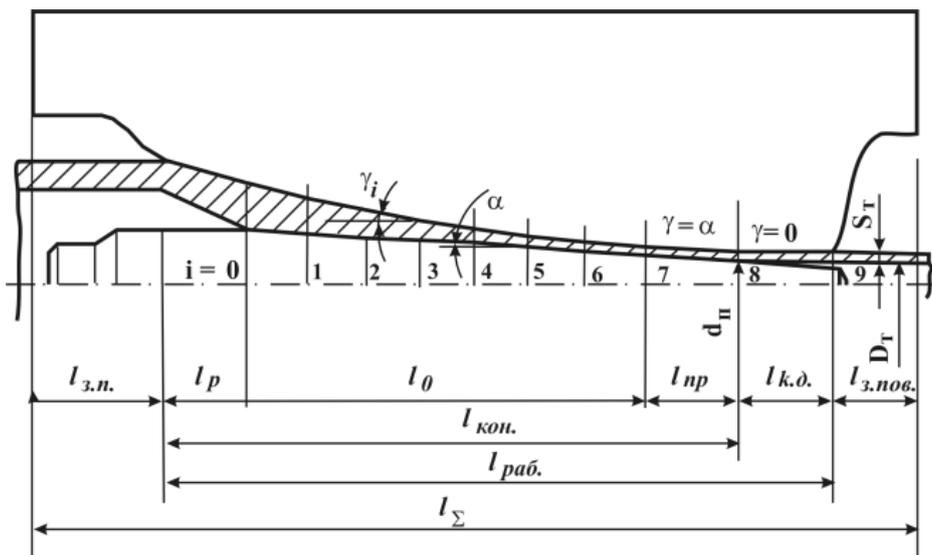


Рис. 1. Конус раскатки в стане ХПТ [1]: $l_{з.п.}$ — длина участка зева подачи; l_p — длина участка редуцирования; l_0 — длина участка обжатия стенки; l_{np} — длина участка калибровки стенки; $l_{к.д.}$ — длина участка калибровки диаметра; $l_{з.пов.}$ — длина зева поворота трубы; $l_{кон.}$ — длина конической части оправки; $l_{раб.}$ — длина рабочей части конуса раскатки; l_{Σ} — длина развертки ручья

$$S_{i+1} = S_i \cdot (1 - \beta \cdot \gamma_i) \quad (2)$$

$$S_{i+1} = S_i \cdot (1 - \beta \cdot \gamma_i) \cdot e^{-\alpha \cdot l_i} \quad (3)$$

где S_i — начальная абсолютная разностенность заготовки; S_{i+1} — начальная относительная разностенность заготовки; e — фундаментальная математическая константа; α — коэффициент интенсивности изменения поперечной разностенности для абсолютных величин; β — коэффициент интенсивности изменения поперечной разностенности для относительных величин; γ_i — суммарная деформация по стенке трубы.

Здесь рассматривается процесс холодной прокатки труб из сплавов на основе титана. Такой процесс характеризуется малым уменьшением диаметра. Здесь деформацию стремятся выполнять в основном по стенке.

Авторы работы [3, 4] выполнили расчетный анализ с использованием программ конечно-элементного моделирования по влиянию величины исходной поперечной разностенности на процесс изменения ее для деформации сплавов на основе титана. Здесь показано, что малая исходная разностенность уменьшается с такой-же интенсивностью, как и разностенность с более высоким уровнем исходной разностенности. Однако представлены результаты только для прокатки сплавов на основе титана.

Вопросами изменения поперечной эксцентричной разностенности занимались в работе [5] для горячей прокатки на оправке, в работе [6] для волочения труб на оправке, в работе [7] для прокатки разнотолщинных листов.

Цель исследования

При производстве холоднодеформированных труб из углеродистых марки сталей с использованием горячеканной заготовки ТПА 200 с трёхвалковым раскатным станом поперечная разностенность труб-заготовок мала. При применении труб-заготовок произведенных на ТПА, имеется возможность получения

холоднодеформированных труб с конечной поперечной разностенностью в несколько процентов. Это позволит производить трубы с учетом требований к точности современных стандартов

Интерес представляет вопрос об изменении малой исходной разностенности (4—5 %) в процессе холодной прокатки труб для достижения возможности получения конечной поперечной разностенностью в один-два процента.

Результаты исследований

Эксперимент осуществили на стане ХПТ-90. Маршрут прокатки 64×8,0 мм→42,4×5,0 мм, сталь 35, величина подачи 10 мм.

Из стана была извлечена недокатанная труба с конусом деформации. Рабочий конус разрезали на 25 частей по длине очага деформации. Перед порезкой наметили прямую линию вдоль рабочего конуса. Это сделали для того, чтобы начало графиков изменения стенки по периметру поперечного сечения частей рабочего конуса начинались от одной продольной линии. Произвели обмеры толщины стенки с помощью трубного микрометра в 8 точках поперечного сечения равномерно удаленных друг от друга по периметру трубы. При этом ориентиром для первой точки все время была линия, проведенная до порезки конуса. После обработки данных полученных в результате эксперимента было принято решение более детально рассмотреть изменение разностенности в зоне обжатия стенки. Для этого определили на участке обжатия стенки среднее значение стенки $S_{ср.}$, максимальную S_{max} и минимальную S_{min} стенку, величину абсолютной ΔS и относительной $R_{отн}$ разностенности, величину относительной суммарной деформации по средней стенке ϵ в сечениях, где был разрезан рабочий конус (таб. 1).

Из графиков изменения абсолютной (рис. 2) и относительной (рис. 3) поперечной разностенности по длине рабочего конуса на участке обжатия стенки вид-

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения

№ перерізу	$S_{\text{ср}}$, мм	S_{min} , мм	S_{max} , мм	Різностінність		Деформація по $S_{\text{ср}}$, %
				ΔS , мм	R , %	
7	8,40	8,24	8,58	0,34	4,0	0,0
8	8,31	8,18	8,51	0,33	4,0	2,4
9	7,87	7,77	8,04	0,27	3,4	7,6
10	7,49	7,42	7,62	0,2	2,7	12,1
11	7,17	7,12	7,27	0,15	2,1	15,9
12	6,90	6,84	6,97	0,13	1,9	19,0
13	6,55	6,48	6,64	0,16	2,4	23,1
14	6,28	6,21	6,34	0,13	2,1	26,3
15	6,09	5,99	6,18	0,19	3,1	28,5
16	5,87	5,79	5,98	0,19	3,2	31,2
17	5,73	5,67	5,81	0,14	2,4	32,7
18	5,70	5,61	5,76	0,15	2,6	33,2
19	5,52	5,44	5,63	0,19	3,4	35,3
20	5,34	5,28	5,43	0,15	2,8	37,3
21	5,33	5,28	5,38	0,1	1,9	37,4

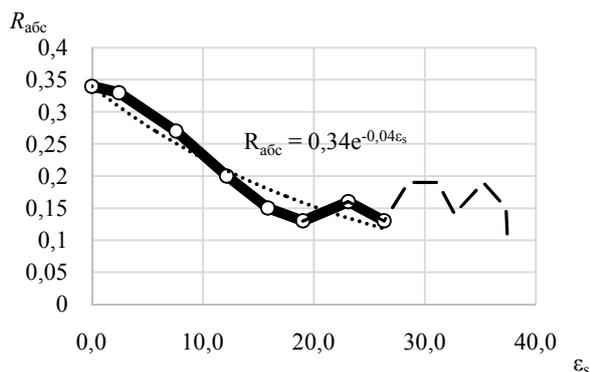


Рис. 2. Экспериментальные данные по изменению абсолютной разностенности по длине рабочего конуса в зоне обжатия стенки рабочего конуса стана ХПТ

но, что до деформации в 25% идет уменьшение разностенности до уровня 2—2,5%, а далее небольшое повышение поперечной разностенности в калибровочной зоне рабочего конуса.

Можно считать, по аналогии с работами [3,4,8], что здесь происходит процесс уменьшения эксцентричной разностенности. Так до достижения деформации в 25% по толщине стенки, отчетливо видно снижение поперечной разностенности как в абсолютных, так и в относительных величинах. А далее после 25% деформации уже превалирует действие по наведению разностенности. Величина этой наведенной разностенности для исследуемого маршрута прокатки составила 1—1,5%. Таким образом, относительная поперечная разностенность с 4% сначала уменьшилась до 2%, а затем к ней добавилось около 1% наведенной разностенности. Готовые трубы имели разностенность на уровне 2—3%.

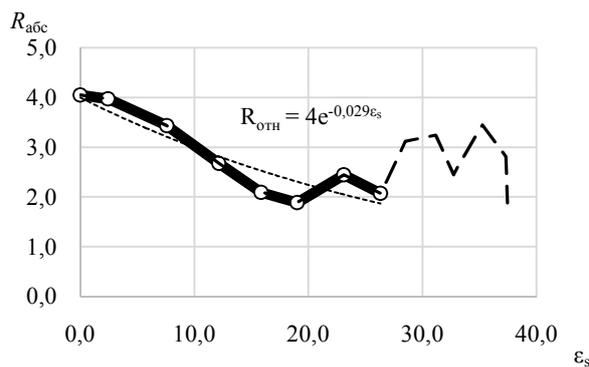


Рис. 3. Экспериментальные данные по изменению относительной поперечной разностенности по длине рабочего конуса в зоне обжатия стенки рабочего конуса стана ХПТ

Анализ графиков (рис. 4) изменения толщины стенки показывает, что до деформации 20,8% характер кривых соответствует эксцентричной разностенности, а при деформациях 35,3% и 37,4% характер кривых соответствует симметричной разностенности.

Полученные результаты позволяют предложить следующую математическую модель изменения поперечной разностенности для случая прокатки углеродистых труб с малой исходной поперечной разностенностью.

Для абсолютной разностенности:

$$\Delta R_{\text{абс}} = R_{\text{абс.0}} e^{\alpha \epsilon_s} \quad (4)$$

Для относительной разностенности:

$$\Delta R_{\text{отн}} = R_{\text{отн.0}} e^{\beta \epsilon_s} \quad (5)$$

Можно рекомендовать такие математические модели для проектирования технологий производства высокоточных труб.

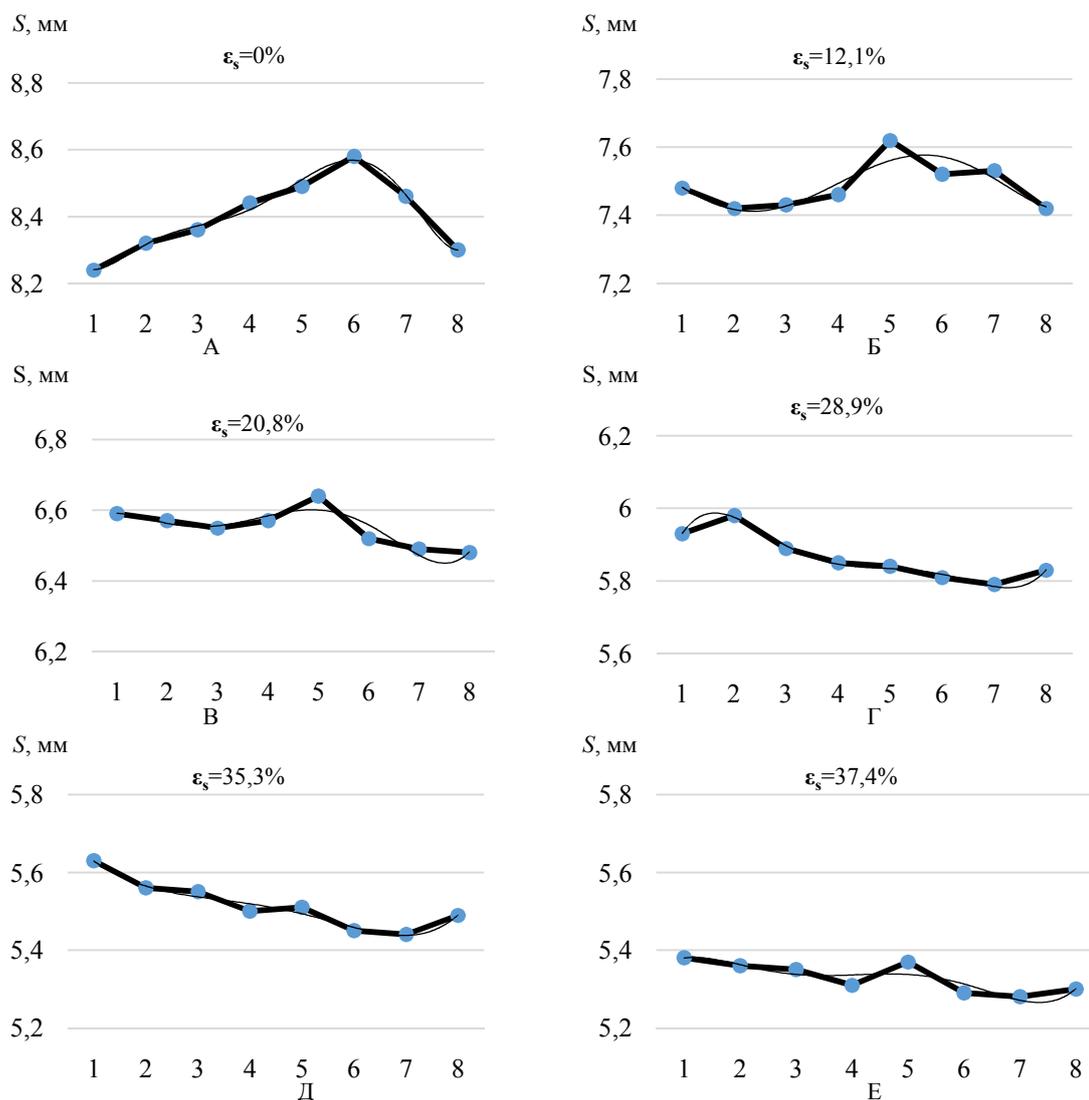


Рис. 4. Изменение толщины стенки по периметру кольцевых образцов в местах порезки рабочего конуса для зоны обжатия стенки: А, Б — начало зоны обжатия стенки; В, Г — середина зоны обжатия стенки; Д, Е — конец зоны обжатия стенки

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Показано экспериментально, что в случае прокатки труб заготовок с малой поперечной разностенностью в 5% возможно снижение разностенности и получение высокоточных труб с поперечной разностенностью в 3%. При этом величина наведенной поперечной разностенности составляет до 1%.

Предложена математическая модель изменения поперечной разностенности для случая прокатки углеродистых труб с малой исходной поперечной разностенностью.

Можно рекомендовать такие математические модели для проектирования технологий производства высокоточных труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григоренко В.У., Клименко П.Л., Ханін М.І. Расчеты калибровки и усилий в станах холодной прокатки

труб с применением ЭВМ: Учебное пособие. – Днепропетровск «НМетаУ», 2000. – 22 с.

- Хаустов Г.И. Исследование точности прокатки холоднокатаных труб: Автореферат дис. на соискание степени канд. тех. наук: спец. 324 «Обработка металлов давлением» / Хаустов Г.И.. – Днепропетровск, 1971. – 20 с.
- Мищенко А.В. Результаты данных компьютерного моделирования и эксперимента по изменению эксцентричной разностенности при холодной деформации на оправке / А.В.Мищенко, В.У.Григоренко, А.Стефанек // Пластическая деформация металлов: сб. научн. трудов в 2-х томах. Днепропетровск : Акцент ПП. – 2014. – Т. 2. – Ст. 295–299.
- Henryk Dyja. Development of forecasting method of change of transverse variation in wall thickness in case of cold rolling of pipes made of titanium alloys / Henryk Dyja, Vladimir Grigorenko, Oleksii Mishchenko // Metallurgical and Mining Industry. – Dnipro, 2017 – No.1 – Pp. 401–404.

5. Данченко В.Н. Продольная прокатка труб /Данченко В.Н., Чус А.В. – М.: Металлургия, 1984. – 137 с.
6. Гуляев Ю.Г. Промышленная апробация способа волочения труб повышенной точности на короткой оправке / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Д.Ю. Гармашев, А.В. Семичев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 29–30.
7. Кузнецов Е.В. Неравномерность деформации при прокатке слоистых полос / Е.В. Кузнецов, В.Г. Павлов // Металлургическая и горнорудная промышленность: Трубы V Международной научно-технической конференции. – Днепропетровск, 2010 – С. 362–364
8. Міщенко О.В. До пояснення механізму зменшення поперечної різностінності труб при холодній прокатці на оправці / Міщенко О.В., Григоренко В.У. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2011. – № 3(28). – С. 216–219.

пост. 07.09.2017