

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ БЕЗ ОПРАВКИ

М.В. Буняшин¹, А.В. Выдрин², Б.В. Баричко², А.С. Кочкин³, Е.В. Храмков⁴

¹ АО «Волжский трубный завод», г. Волжский, Россия,

² ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»), г. Челябинск, Россия,

³ ПАО «Ашинский металлургический завод», г. Аша, Россия,

⁴ ООО «Научно-технический центр ТМК» (ООО «ТМК НТЦ»), г. Москва, Россия

Процесс непрерывной горячей прокатки характеризуется наличием продольных усилий, оказывающих существенное влияние на толщину стенки трубы. При этом очень важно правильно определять величину редуцирования в процессе деформации трубы для получения толщины стенки в диапазоне, оговоренном нормативными документами. Целью работы было получение экспериментальных данных о влиянии продольного усилия на толщину стенки трубы и сравнение их с результатами расчета по одной из известных зависимостей.

Проведено физическое моделирование процесса прокатки труб без оправки. Для проведения эксперимента разработана схема и подготовлена технологическая оснастка, позволившие создать условия непрерывной прокатки трубы с задним натяжением. Оригинальность эксперимента заключалась в том, что он предусматривал использование ступенчатых образцов исходной трубной заготовки, имеющих цилиндрический и конический участки. Цилиндрический участок обеспечивал свободное прохождение заготовки через деформирующую втулку и устойчивый захват прокатными валками, а конический – создание заднего продольного усилия при прокатке. Величина заднего натяжения определялась расчетным путем как усилие волочения трубы.

Показан характер изменения толщины стенки трубы при возрастании величины межклеточного натяжения.

По результатам физического моделирования был сделан вывод о правомочности применения известной теоретической зависимости для определения толщины стенки трубы при горячем редуцировании труб с приложением заднего натяжения.

Полученные результаты планируется использовать для оценки усилия, требуемого для стягивания трубы с оправки. Данный процесс реализуется на ТПА 159–426 с непрерывным раскатным станом АО «Волжский трубный завод».

Ключевые слова: бесшовные трубы, непрерывная прокатка, физическое моделирование, экспериментальное исследование, межклеточное натяжение, изменение толщины стенки.

Процесс непрерывной продольной прокатки широко используется при изготовлении бесшовных труб на различных этапах технологии: раскатка стенки, снятие трубы с оправки, калибровка или редуцирование трубы [1–6].

Для повышения устойчивости трубного раската в очаге деформации процесс, как правило, осуществляют с натяжением в межклеточном промежутке, что оказывает существенное влияние на геометрию поперечного сечения трубы – в первую очередь на изменение толщины стенки [7, 8]. Знание закономерности изменения толщины стенки в условиях изменения величины заднего натяжения, создаваемого предыдущей по ходу прокатки кле-

тью или оправкой при стягивании с нее трубы, позволяет правильно управлять кинематикой процесса прокатки, обеспечивая тем самым минимальные отклонения толщины стенки по длине трубы [9].

Для количественного определения толщины стенки трубы может быть использована зависимость В.Л. Колмогорова [10], согласно которой толщину стенки трубы (s_i) при безоправочной прокатке определяют по формуле

$$s_i = s_{i-1} \left(\frac{d_{i-1}}{d_i} \right)^A, \quad (1)$$

где d_i и d_{i-1} – наружный диаметр трубы соответственно в i -й и $i-1$ -й клетях; s_{i-1} – толщина

Обработка металлов давлением...

стенки трубы после $i-1$ -й клетки; A – коэффициент, определяемый как

$$A = 0,5 \left(1 - \frac{3\eta}{\sqrt{4 - 3\eta^2}} \right), \quad (2)$$

где $\eta = \sigma / \sigma_s$ – пластический коэффициент натяжения. Здесь σ и σ_s – соответственно напряжение заднего натяжения и сопротивление металла пластической деформации.

Для проверки зависимости толщины стенки от величины заднего натяжения в процессе горячего редуцирования трубы в двухвалковом калибре проведено экспериментальное исследование на лабораторной установке ЭУ-ПППТ (рис. 1а) [11]. На станине клетки со стороны задачи заготовки в валки устанавливали проводку с деформирующей втулкой (рис. 1б), выполненной в виде монолитной волоки. Заготовку в виде трубы из стали 20, имеющей два участка – цилиндрический и конический, – изготавливали с использованием металлорежущих операций (рис. 2). Толщина стенки цилиндрического участка трубы

при изготовлении образцов составляла 2,0 и 3,0 мм. Особенностью описываемого физического моделирования было то, что при обработке полученных результатов в качестве отклика процесса использовали изменение толщины стенки трубы, а величину заднего натяжения определяли аналитическим методом – как усилие волочения круглого профиля.

Заготовка перед пластической деформацией нагревалась в лабораторной камерной печи до температуры 1000 °С, после чего задалась в валки двухвалковой клетки «250» через установленную перед ней оснастку для создания заднего натяжения.

При прокатке передний цилиндрический участок заготовки диаметром 33,0 мм захватывался валками и прокатывался в круглом калибре диаметром $D = 31,0$ мм без натяжения до того момента, пока диаметр конического участка заготовки ($D_{зк}$) не достигал значения диаметра отверстия деформирующей втулки (D_k). Далее при продольном перемещении образца его конический участок под-

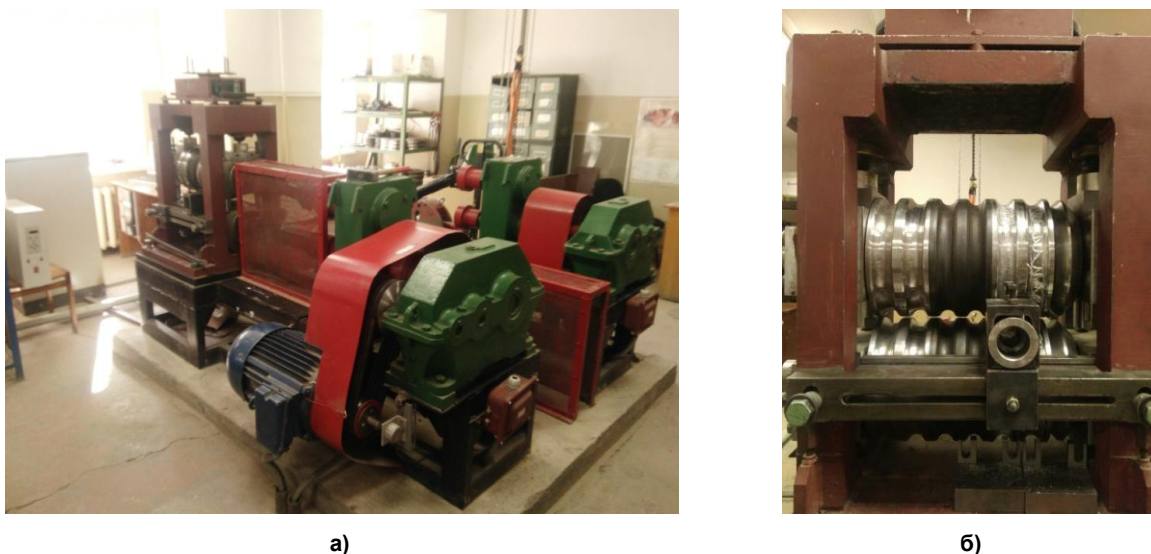


Рис. 1. Экспериментальная установка ЭУ-ПППТ: а – общий вид; б – вид со стороны задачи заготовки

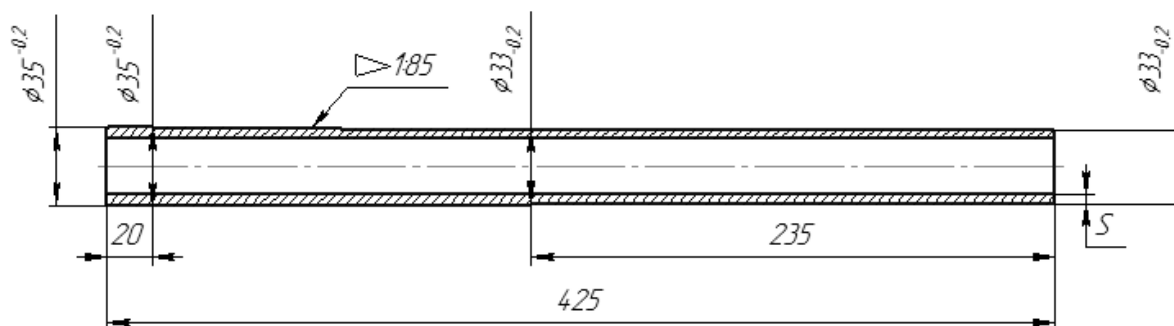


Рис. 2. Заготовка для экспериментального исследования

вергался горячему волочению в деформирующей втулке с переменным обжатием, в результате чего плавно изменялась величина продольного усилия, действующего на задний конец прокатываемой заготовки. Степень деформации в процессе исследования составляла примерно 4 %, что является традиционной величиной, применяемой на редуционно-растяжных станах горячей прокатки труб [12, 13].

Для измерения толщины стенки (S) от участков образцов труб, подвергнувшихся пластической деформации с натяжением, изготавливали темплеты путем поперечной резки прокатанного образца с шагом 5,0 мм (рис. 3).

Сканы поперечных сечений 8–13 (см. рис. 3) прокатанных образцов труб представлены на рис. 4.

Зная расстояние от плоскости выхода металла из деформирующей втулки до вертикальной плоскости валков прокатной клетки и коэффициент вытяжки при прокатке, определяли сечение конического участка заготовки, соответствующего текущему сечению цилиндрического участка трубы.

Пластический коэффициент натяжения η определяется как отношение σ/σ_s , при этом величина σ при волочении составляет [14]

$$\sigma = n\sigma_s \ln \mu(1 + fctg\alpha), \quad (3)$$

где μ – коэффициент вытяжки при волочении;

f – коэффициент трения (в условиях горячей деформации без смазки принимали $f = 0,6$ [15]); α – полуугол канала волоки (в нашем случае $\alpha = 22,5^\circ$); n – коэффициент неравномерности деформации. Здесь $\mu = (D_{зк}/D_k)^2$, где $D_{зк}$, D_k – соответственно диаметры конического участка заготовки (текущий) и канала волоки ($D_k = 34,8$ мм).

На рис. 5 показано распределение величины пластического коэффициента натяжения η по длине прокатанного образца, из которого видно, что поперечное сечение 1 образца трубы соответствует прокатке без заднего натяжения, а сечения 12–16 соответствуют прокатке с одинаковой величиной заднего натяжения (цилиндрический участок на заднем конце заготовки).

Результаты измерений величины наружного диаметра и толщины стенки прокатанного образца в каждом поперечном сечении усреднялись. Измерения наружного диаметра осуществлялись в 4 плоскостях в каждом поперечном сечении, толщины стенки – в восьми точках.

На рис. 6 представлены теоретические и фактические значения толщины стенки для труб с толщиной стенки 2,0 и 3,0 мм.

Из рис. 6 видно, что разница между расчетными и фактическими значениями толщины

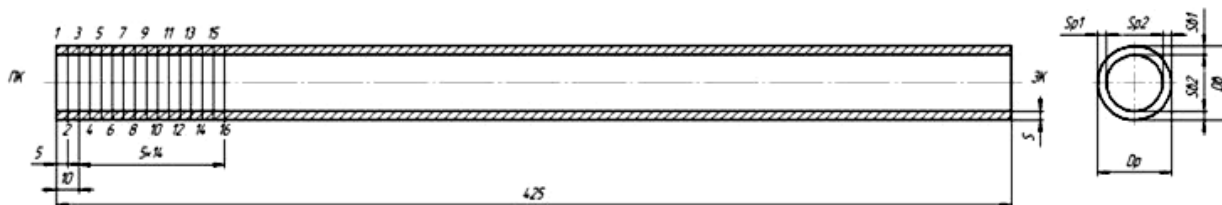


Рис. 3. Схема замеров прокатанных труб: ПК, ЗК – соответственно передний и задний концы заготовки

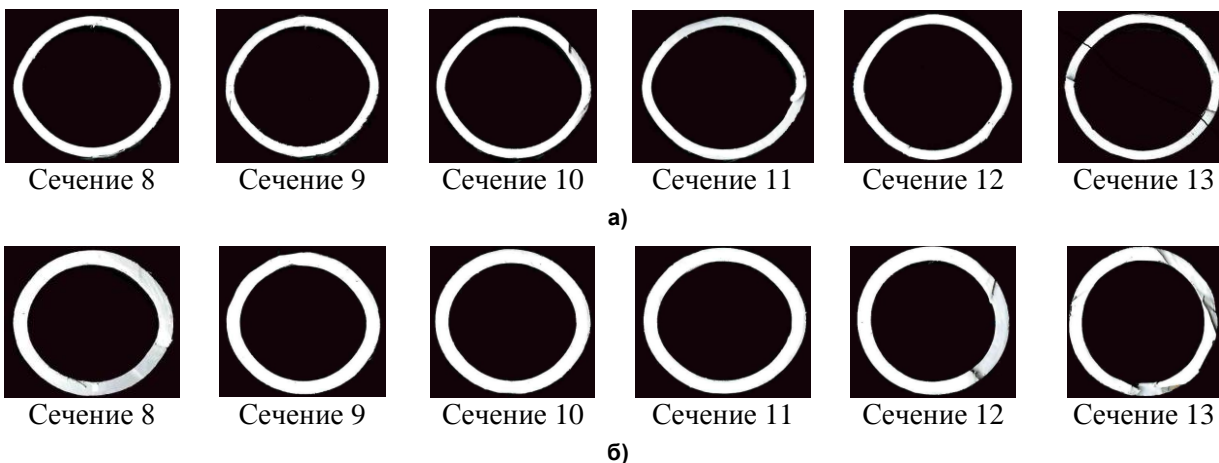


Рис. 4. Сканы поперечных сечений прокатанных образцов труб с толщиной стенки: а – 2,0 мм; б – 3,0 мм

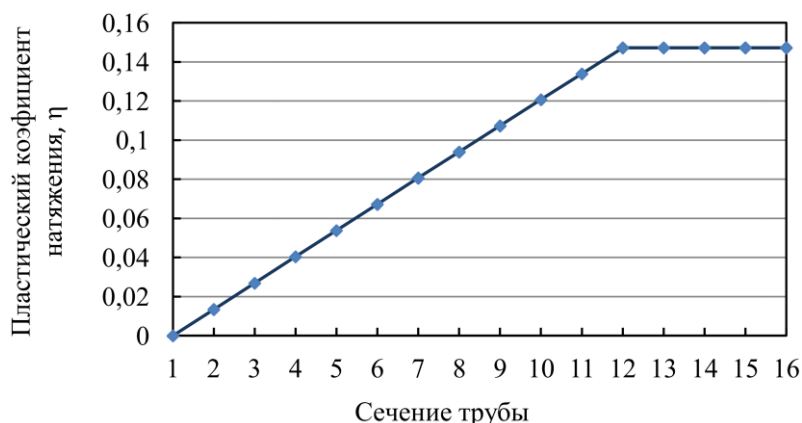


Рис. 5. Распределение коэффициента η по длине образца с толщиной стенки 3,0 мм

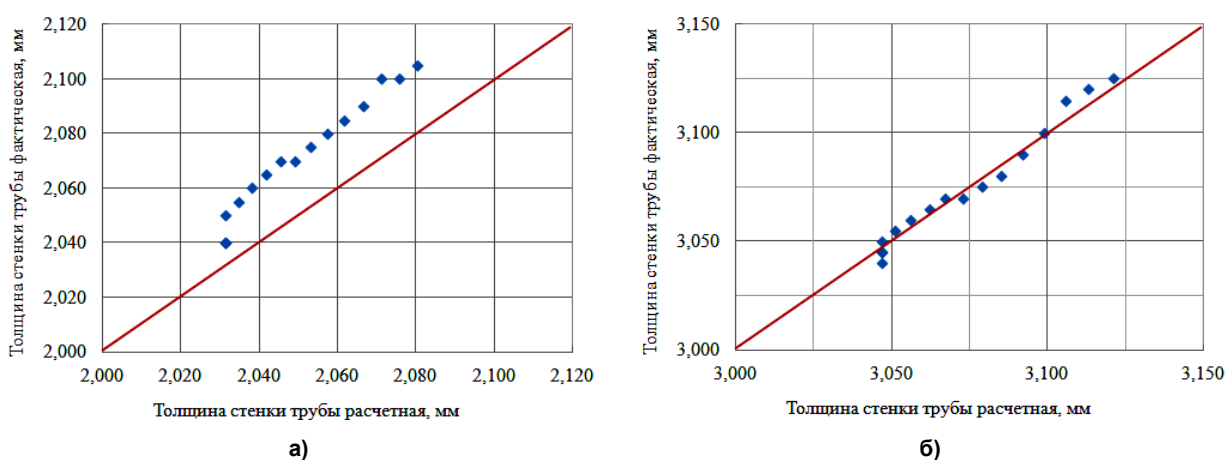


Рис. 6. Графики фактических и расчетных значений толщины стенки: а – 2,0 мм; б – 3,0 мм

Результаты статистической обработки данных о толщине стенки трубы

| D/S | Толщина стенки S , мм | | | Стандартное отклонение | Дисперсия выборки | Стандартная ошибка | Сумма |
|-------|-------------------------|-------------|---------|------------------------|-------------------|--------------------|--------|
| | максимальная | минимальная | средняя | | | | |
| 15,5 | 2,080 | 2,031 | 2,050 | 0,017 | 0,000291 | 0,004263 | 32,802 |
| 10,3 | 3,121 | 3,047 | 3,074 | 0,026 | 0,000654 | 0,006393 | 49,192 |

ны стенки наблюдается в большей степени для труб со стенкой 2,0 мм.

Максимальная относительная величина разницы теоретических и экспериментальных значений толщины стенки трубы составила для труб с отношением наружного диаметра к толщине стенки (D/S): 15,5 – 6,02 %; 10,3 – 2,86 %.

Результаты статистической обработки данных по теоретическим значениям толщины стенки представлены в таблице.

По результатам физического моделирования можно сделать вывод о правомочности применения известной теоретической зависимости (1) для определения толщины стенки

трубы при горячем редуцировании труб с приложением заднего натяжения. Сделанный вывод актуален также для извлекательно-калибровочных станков, так как процесс стягивания трубы с оправки после непрерывного стана сопровождается изменением толщины стенки трубы за счет создания натяжения.

Литература

1. Друян, В.М. Теория и технология трубного производства: учеб. / В.М. Друян, Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов. – Днепропетровск: РИИ «Днепр-ВАЛ», 2001. – 544 с.
2. Технология и оборудование трубного производства: учеб. пособие для вузов /

В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 560 с.

3. Зимовец, В.Г. Современное производство стальных труб / В.Г. Зимовец. – Волжский: Волжский полиграфкомбинат, 1998. – 520 с.

4. Богатов, А.А. Исследование влияния коэффициента кинематического натяжения на формоизменение трубы в выпусках калибра при прокатке на короткой оправке / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Е.А. Павлова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – № 2. – С. 96–100.

5. Исследование влияния технологических факторов на качество горячекатаных труб / Е.В. Храмков, А.С. Кочкин, Б.В. Баричко, А.В. Никитин // Труды 21-й Международной научно-практической конференции «Трубы–2014» – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2014 – Ч. II – С. 242–245.

6. Ершов, Ю.Л. Особенности проектирования непрерывных оправочных станков с двух- и трехвалковыми клетями / Ю.Л. Ершов, Б.И. Тартаковский // Бюллетень «Черная металлургия», 2011. – № 10. – С. 80–91.

7. Столетний, М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. – М.: Металлургия, 1975. – 240 с.

8. Потапов, И.Н. Теория трубного производства: учеб. для вузов / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян. – М.: Металлургия, 1991. – 424 с.

9. Выдрин, А.В. Развитие теории процес-

сов производства и отделки бесшовных труб / А.В. Выдрин, Б.В. Баричко, Я.И. Космацкий // Пластическая деформация металлов: сб. науч. тр.: в 2 т. / Национальная металлургическая академия Украины. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – Т. 1. – С. 83–88.

10. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. – М.: Металлургиздат, 1963. – С. 644–647.

11. Создание комплекса оборудования для исследования и моделирования процессов деформации труб / И.Ю. Пыльминцев, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др. // Труды 17-й Международной научно-практической конференции «Трубы–2009». – Челябинск: ОАО «РосНИТИ». – 2009. – С. 328–331.

12. Анализ путей уменьшения концевой обреза при редуцировании труб с натяжением / Ю.Г. Гуляев, И.А. Шапиро, А.Г. Польский и др. // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 1–2. – С. 45–48.

13. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г.И. Гуляев, П.Н. Ившин, И.Н. Ерохин и др. – М.: Металлургия, 1975. – 264 с.

14. Баричко, Б.В. Основы технологических процессов ОМД: учеб. пособие / Б.В. Баричко, Ф.С. Дубинский, В.И. Крайнов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2008. – 131 с.

15. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справ. / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

Бунышин Михаил Васильевич, начальник центральной заводской лаборатории, АО «Волжский трубный завод», г. Волжский; BunyashinMV@vtz.ru.

Выдрин Александр Владимирович, д-р техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»), г. Челябинск; vydrinav@rosniti.ru.

Баричко Борис Владимирович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волочения и прессования, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»), г. Челябинск; barichko@rosniti.ru.

Кочкин Александр Сергеевич, инженер-технолог технического отдела, ПАО «Ашинский металлургический завод», г. Аша; kochkin@amet.ru.

Храмков Евгений Владимирович, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией цифровизации технологий, ООО «Научно-технический центр ТМК» (ООО «ТМК НТЦ»), г. Москва; KhramkovEV@tmk-group.com.

Поступила в редакцию 14 августа 2019 г.

PHYSICAL MODELING OF GEOMETRIC AND FORCE PARAMETERS OF THE CONTINUOUS LONGITUDINAL ROLLING OF TUBES WITHOUT A MANDREL

M.V. Bunyashin¹, *BunyashinMV@vtz.ru*,
A.V. Vydrin², *VydrinAV@rosniti.ru*,
B.V. Barichko², *barichko@rosniti.ru*,
A.S. Kochkin³, *kochkin@amet.ru*,
E.V. Khramkov⁴, *KhramkovEV@tmk-group.com*

¹ JSC "Volzhsky Pipe Plant", Volzhsky, Russian Federation,

² JSC "Russian Research Institute for the Tube and Pipe Industries" (JSC "RosNITI"), Chelyabinsk, Russian Federation,

³ PJSC "Asha Metallurgical Plant", Asha, Russian Federation,

⁴ LLC "Scientific and Technical Center TMK" (LLC "TMK STC"), Moscow, Russian Federation

The process of continuous hot rolling is characterized by the presence of longitudinal forces that have a significant effect on the thickness of the pipe wall. It is very important to correctly determine the amount of reduction in the process of pipe deformation in order to obtain the wall thickness in the range specified by regulatory documents. The aim of the work was to obtain experimental data on the influence of the longitudinal force on the wall thickness of the pipe and compare them with the calculation results for one of the known dependencies.

Conducted a physical simulation of the process of rolling tubes without mandrel. For the experiment, a scheme has been developed and technological equipment has been prepared, which made it possible to create conditions for the continuous rolling of a pipe with rear tension.

The originality of the experiment was that it provided for the use of stepwise samples of the initial tube billet having cylindrical and conical sections. The cylindrical section provided the free passage of the workpiece through the deformation sleeve and a stable grip by the rolling rolls, while the conical section provided the creation of a rear longitudinal force during rolling. The magnitude of the rear tension was determined by calculation as the force of drawing the pipe.

Shows the nature of the change in the thickness of the pipe wall with increasing magnitude of interstand tension.

Based on the results of physical modeling, a conclusion was drawn on the appropriateness of using the well-known theoretical dependence for determining the wall thickness of a pipe during hot reduction of pipes with back tension applied.

The results obtained are planned to be used to assess the force required to pull the pipe from the mandrel. This process is implemented on a TPA 159-426 extraction mill with a continuous rolling mill of Volzhsky Pipe Plant JSC.

Keywords: seamless tubes, continuous rolling, physical modeling, experimental research, intercellular tension, wall thickness change.

References

1. Druyan V.M., Gulyaev Yu.G., Chukmasov S.A. *Teoriya i tekhnologiya trubnogo proizvodstva: uchebnyk* [Theory and technology of pipe production]. Dnepropetrovsk, RIA "Dnepr-VAL" Publ., 2001, 544 p.
2. Osadchiy V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Technology and equipment for pipe production]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2007, 560 p.
3. Zimovets V.G. *Sovremennoe proizvodstvo stal'nykh trub* [Modern steel pipe production]. Volzhskiy, Volzhskiy poligrafkombinat Publ., 1998, 520 p.
4. Bogatov A.A., Pavlov D.A., Pavlova E.A. Study of the Effect of Kinematic Tension Coefficient on Tube Forming in Groove Taper During Lengthwise Rolling on a Stub Mandrel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 96–100. (in Russ.)

5. Khramkov E.V., Kochkin A.S., Barichko B.V., Nikitin A.V. [The study of the influence of technological factors on the quality of hot rolled pipes]. *The 21 International Technology and Application Conference "PIPES-2014". Proceedings book*. Chelyabinsk, RosNITI, JSC, 2014, vol. 2, pp. 242–245. (in Russ.)
6. Ershov Yu.L., Tartakovskiy B.I. [Design features of continuous mandrels with two and three roll stands]. *Newsletter Ferrous Metallurgy*, 2011, no. 10, pp. 80–91. (in Russ.)
7. Stoletniy M.F., Klempert E.D. *Tochnost' trub* [Pipe accuracy]. Moscow, Metallurgy Publ., 1975, 240 p.
8. Potapov I.N., Kolikov A.P., Druyan V.M. *Teoriya trubnogo proizvodstva* [Theory of pipe production]. Moscow, Metallurgy Publ., 1991, 424 p.
9. Vydrin A.V., Barichko B.V., Kosmatskiy Ya.I. [Development of the theory of processes for the production and finishing of seamless pipes]. *Plastic deformation of metals: collection of scientific papers in 2 volumes*. National Metallurgical Academy of Ukraine. Dnepropetrovsk, Accent PP Publ., 2014, vol. 1, pp. 83–88. (in Russ.)
10. Tarnovskiy I.Ya., Pozdeev A.A., Ganago O.A. et al. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1963, pp. 644–647.
11. Pyshmintsev I.Yu., Vydrin A.V., Barichko B.V. et al. [Creation of a complex of equipment for research and modeling of pipe deformation processes]. *The 17 International Technology and Application Conference "PIPES-2009". Proceedings book*. Chelyabinsk, RosNITI, JSC, 2009, pp. 328–331. (in Russ.)
12. Gulyaev Yu.G., I.A. Shapiro, A.G. Pol'skiy et al. [Analysis of ways to reduce end trim when reducing pipes with tension]. *Theory and Practice of Metallurgy*, 2012, no. 1–2, pp. 45–48. (in Russ.)
13. Gulyaev G.I., Ivshin P.N., Erokhin I.N. et al. *Tekhnologiya nepreryvnoy bezopravochnoy prokatki trub* [Continuous Tubeless Rolling Technology]. Moscow, Metallurgy Publ., 1975, 264 p.
14. Barichko, B.V., Dubinskiy F.S., Kraynov V.I. *Osnovy tekhnologicheskikh protsessov OMD: uchebnoe posobie* [Bases of technological processes of metal forming: textbook]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2008, 131 p.
15. Grudev A.P., Zil'berg Yu.V., Tiliq V.T. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem: spravochnik* [Friction and lubrication in metal forming: a guide]. Moscow, Metallurgy Publ., 1982, 312 p.

Received 14 August 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Физическое моделирование геометрических и силовых параметров процесса непрерывной продольной прокатки труб без оправки / М.В. Бунышин, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 49–55. DOI: 10.14529/met190406

FOR CITATION

Bunyashin M.V., Vydrin A.V., Barichko B.V., Kochkin A.S., Khramkov E.V. Physical Modeling of Geometric and Force Parameters of the Continuous Longitudinal Rolling of Tubes without a Mandrel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 49–55. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190406
