УДК 621.771.63-462.2

DOI 10.17073/0368-0797-2021-1-21-27

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ФОРМОВКЕ ПРЯМОШОВНЫХ ТРУБ

С. В. Самусев, А. В. Кондрушин, В. А. Фадеев

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Одним из эффективных методов исследования любого процесса является его физическое моделирование, в ходе которого возможна проверка данных, полученных ранее. В лаборатории ОМД НИТУ «МИСиС» имеется ТЭСА 30-50 для исследования процессов непрерывной формовки прямошовных сварных труб малого и среднего диаметров. Рассматривается очаг непрерывной деформации трубной заготовки на примере двух первых клетей формовочного стана с калибровкой валкового инструмента для трубы 50×1,5 мм. На базе методик расчета параметров реальных валковых калибров разработана схема контактного взаимодействия трубной заготовки с первым и вторым валковыми калибрами и определены участки очага деформации с определением их размеров. Анализируя условия контактного взаимодействия трубной заготовки с валковыми калибрами, определены параметры трубной заготовки в контакте с валками первого калибра по семи разрезам, принимая во внимание особенности непрерывного формоизменения в линии валкового формовочного стана. С учетом полученных данных проведен расчет продольных деформаций для кромки и дна трубной заготовки. Анализ результатов показал, что максимальная продольная деформация возникала в кромке трубной заготовки в разрезе Б – Б и равна 1,04 %, а по дну трубной заготовки – 0,92 %. Для проведения эксперимента на трубную заготовку была нанесена координатная сетка при помощи лазерного гравера. В ходе формовки зафиксировано отклонение траектории дна трубной заготовки от горизонтальной оси, определены размеры участков формовки. Сравнение теоретических и экспериментальных значений показало, что расхождение значений не превышает 7 %.

Ключевые слова: электросварная труба, непрерывная формовка, контактное взаимодействие, формовочный стан, калибры

Для цитирования: Самусев С.В., Кондрушин А.В., Фадеев В.А. Исследование формоизменения при непрерывной формовке прямошовных труб // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 1. С. 21–27. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-21-27>

DEFORMATION AT CONTINUOUS FORMING OF LONGITUDINAL WELDED PIPES

S. V. Samusev, A. V. Kondrushin, V. A. Fadeev

National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. One of the effective methods for studying any process is its physical modeling, during which it is possible to verify the concepts and hypothesis obtained previously by theoretical modeling. In the laboratory of metal forming of NUST "MISIS" there is ERW mill 30 – 50 for the production and simulation of processes for the continuous forming of longitudinal welded pipes of small and medium diameter, their welding and calibration. This article discusses the deformation zone of a pipe billet, using the first two stands of a molding mill as an example with a calibration of a roll tool for a pipe diam. 50×1.5 mm. Based on the analysis of methods for calculating the parameters of real roll calibers, a model of contact interaction of the pipe billet with the first and second roll open stands was developed and areas of the deformation zone were determined including their sizes: non-intensive and intense impact; input and output contact zones; springing up. Analyzing the conditions of contact interaction of the pipe billet with roll calibers, parameters of the pipe billet in contact with the first-caliber rolls were determined in seven sections, taking into account the features of continuous forming. An analysis of the results has shown that the maximum longitudinal deformation occurred at the edge of the billet in section B – B and was equal to 1.04 %, and for the pipe billet bottom it was 0.92 %. For the experiment, a grid was applied to the pipe billet using a laser engraver. During forming, the trajectory deviation of the pipe billet bottom from horizontal axis was recorded, and sizes of the forming sections were determined. Comparison of theoretical and experimental values has shown that the discrepancy between them does not exceed 7 %.

Keywords: electric welded pipe, continuous forming, contact scheme, electric-weld pipe mill, forming mill, caliber

For citation: Samusev S.V., Kondrushin A.V., Fadeev V.A. Deformation at continuous forming of longitudinal welded pipes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-21-27>

В связи с широким использованием стальных труб в таких отраслях, как строительство, машиностроение, энергетика повышаются требования к точности геометрических параметров и к другим технологическим характеристикам, которые определяют качество готового изделия [1 – 5]. Для этого разрабатываются

технологические схемы, в которых определяющими параметрами формоизменения металла являются геометрия исходной заготовки и деформационного инструмента, температура и скорость [6 – 10]. Для определения и выявления оптимальных сочетаний параметров процесса формоизменения металла ис-

пользуются различные методы исследования [11 – 14] и оборудование [15 – 19].

Сортамент изготавливаемых труб предопределил множество способов производства, агрегатов и станков, на которых он реализуется [20 – 23]. Каждый из способов характеризуется наиболее эффективным диапазоном получаемых труб. Предъявляемые требования к трубам являются существенным критерием при выборе способа их производства [24 – 27].

В данной работе рассмотрены вопросы, посвященные особенностям производства прямошовных сварных труб малого и среднего диаметра, а именно процесс непрерывного формоизменения заготовки на участке открытых калибров с учетом контактного взаимодействия заготовки и инструмента.

Теоретическая и экспериментальная части выполнены на базе ТЭСА 30-50 НИТУ «МИСиС».

Параметры формованной заготовки в реальном валковом очаге имеют существенные отличия от параметров заготовки, представленных в теоретических работах [28 – 31].

Параметры валкового очага формовки определили для трубной заготовки (для трубы $D = 50$ мм, $S = 1,5$ мм), формуемой в первой и второй формовочных калибрах.

Для открытых валковых калибров формовочного стана рассчитали схему взаимодействия заготовки с первым и вторым валковыми калибрами и обозначили семь фиксированных разрезов (рис. 1).

Для первого калибра определили участки формовки:

- неинтенсивной формовки ($l_{1,1}$);

- интенсивной формовки ($l_{1,2}$);
- входной контактной формовки ($l_{1,3}$);
- выходной контактной формовки ($l_{1,4}$);
- распруживания заготовки после калибра ($l_{1,5}$).

Полную длину очага деформации первого калибра определили из суммы длин перечисленных выше участков ($l_{1,1} + l_{1,2} + l_{1,3} + l_{1,4} + l_{1,5}$), которая равна 312,2 мм.

Для второго калибра также определили размеры участков формовки (см. рис. 1).

Значения протяженности участков $l_{1,2}$ и $l_{1,3}$ вычислили по методике [32], длину контактного участка $l_{1,3}$ – по методике [33], длины участков $l_{1,4}$ и $l_{1,5}$ определили по работе [34], длину участка $l_{1,1}$ – по методике [35], длину участка $l_{2,1}$ вычислили вычитанием из межклетевого расстояния суммы остальных участков деформации, находящихся между первым и вторым калибрами ($l_{2,1} = l_{м.к} - (l_{1,4} + l_{1,5} + l_{2,2} + l_{2,3}) = 145$ мм).

Для семи разрезов заготовки первого калибра по параметрам контактных участков формовки графическим способом построены профили заготовки (для центральных и периферийных участков определены радиусы формовки и длины дуг участков, для дна трубной заготовки – значения отклонения от горизонтальной оси формовки).

В разрезе А – А форма профиля заготовки обусловлена ее контактом по одной точке с ребрами нижнего валка и одной точкой с верхним валком. В разрезах Б – Б и В – В увеличивали контактные площади заготовки с инструментом. В разрезе Г – Г принимали условие полного контакта заготовки с инструментом. В разрезах Д – Д и Е – Е уменьшали контактные зоны

Рис. 1. Схема взаимодействия заготовки с первым и вторым валковыми калибрами формовочного стана и семь фиксированных разрезов

Fig. 1. Scheme of contact interaction of the billet with the first and second roll calibers of the forming mill and seven fixed sections for each caliber

Рис. 2. Профили трубной заготовки в контакте с валками первого калибра по семи разрезам

Fig. 2. Parameters of the pipe billet in contact with the rolls of the first caliber by seven sections

Рис. 3. Продольные деформации трубной заготовки на участке открытых калибров

Fig. 3. Longitudinal deformations of a pipe billet in the area of open passes

а

б

Рис. 4. Параметры экспериментального исследования:

а – замер размеров координатных ячеек заготовки после формовки; б – развертка координатной сетки после формовки

Fig. 4. Experimental parameters:

а – measurement of dimensions of the coordinate cells of the billet after forming; б – unfolding the coordinate grid after forming

с инструментом в соответствии с рекомендациями работы [33]. В разрезе Ж – Ж принимали условие контакта по трем точкам. Ширина заготовки во всех разрезах оставалась неизменной.

Размеры участков формовки и значения продольных деформаций по расчетным и экспериментальным данным

Dimensions of the forming zones and the values of longitudinal deformations according to the calculated and experimental data

Сравнение длин участков формовки			
участок	расчетное значение, мм	экспериментальное значение, мм	Δ , %
$l_{1.1}$	155,7	165	6
$l_{1.2}$	58,5	62	5,9
$l_{1.3}$	34,6	37	6,9
$l_{1.4}$	23,6	25	5,9
$l_{1.5}$	39,8	42	5,5
Сравнение деформаций по разрезам контактных участков формовки			
разрез	расчетное значение деформации max, %	экспериментальное значение деформации max, %	Δ , %
А – А	0,23	0,24	4,3
Б – Б	1,04	1,07	2,9
В – В	0,65	0,63	3,1
Г – Г	–0,28	–0,29	3,6
Д – Д	–0,42	–0,44	4,8
Е – Е	–0,6	–0,62	3,3
Ж – Ж	–0,76	–0,79	3,9

Построение профилей заготовки выполняли в графическом редакторе программы КОМПАС-3D при помощи инструмента «Сплайн» (рис. 2).

В основе расчета деформированного состояния трубной заготовки лежит определение траекторий фиксированных волокон [36, 37] в соответствии со схемой взаимодействия трубной заготовки с валковыми калибрами (см. рис. 1).

На рис. 3 представлены продольные деформации кромки и дна трубной заготовки по длине очага формовки.

Характерной особенностью деформированного состояния трубной заготовки является неравномерность и цикличность продольных деформаций по длине участка формовки. Во внеконтактном участке формовки перед калибрами происходит растяжение кромок (продольная деформация достигает максимума 1,09 % при переходе во входной контактный участок). Далее происходит сжатие кромок (деформация уменьшается до 0,78 %). На выходе из участка распружинивания деформация достигает значения до 0,04 %.

Для оценки расчетов был проведен эксперимент по формовке трубной заготовки в лаборатории ОМД НИТУ «МИСиС» [38].

Перед подачей в формовочный стан заготовку разместили на лазерном гравюре сеткой с размером ячейки 20×20 мм. Определение значений размеров ячеек для расчета продольных деформаций осуществили в следующем порядке.

Разместили все ячейки заготовки. Сняли контурным шаблоном параметры профилей заготовки по размеченным линиям. Перенесли размеры профилей сетки на миллиметровую бумагу и определили координаты точек сетки на профилях, радиусы и значения углов по-

перечных разрезов заготовки. Оцифровали продольные сечения, измерили размеры ячеек сетки (фиксировали изменения исходных размеров координатных ячеек) (рис. 4, а).

Размеры, снятые электронным штангенциркулем, накладывали на оцифрованные сечения и определяли изменения длин ячеек, получив развертку координатной сетки с размерами ячеек после формовки (рис. 4, б). На основе развертки вычислили значения продольных деформаций и сравнили с расчетными значениями (см. таблицу).

Выводы

По схеме взаимодействия трубной заготовки с валковыми калибрами определены отдельные участки

формовки и их размеры. Протяженность участков неконтактной формовки составила 69 % от очага формовки калибра, протяженность участков контактной формовки – 19 %, протяженность участка распружинивания – 12 %.

Установлено, что протяженность участков контактного взаимодействия по ширине заготовки с валками по разрезам составила в первом сечении 4,5 %, во втором 12 %, в третьем 19 %, в четвертом 100 %, в пятом 42,5 %, в шестом 23 %, в седьмом 4,3 %.

Полученные значения продольных деформаций позволили выявить знакопеременную особенность формоизменения заготовки в валковых калибрах.

Проведенный эксперимент подтвердил, что отклонения расчетных и замеренных значений деформаций трубной заготовки не превышают 7 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Шаталов Р.Л., Медведев В.А. Управление температурой прокатки заготовок стальных сосудов на прокатно-прессовой линии для стабилизации механических свойств // *Металлург*. 2019. № 10. С. 64–68. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00925-w>
2. Алещенко А.С., Будников А.С., Харитонов Е.А. Исследование формоизменения металла в процессе редуцирования труб на трехвалковом стане // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 10. С. 756–762. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-756-762>
3. Romantsev B., Goncharuk A., Aleshchenko A., Gamin Y., Mintakhanov M. Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes' production // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. No. 9–12. P. 3223–3230. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2134-3>
4. Abeyrathna B., Rolfe B., Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. No. 1–4. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0164-x>
5. Шаталов Р.Л., Медведев В.А. Влияние неравномерности температуры деформируемой заготовки на механические свойства тонкостенных стальных сосудов при обработке на прокатно-прессовой линии // *Металлург*. 2019. № 2. С. 53–57. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00807-w>
6. Кадач М.В., Кошмин А.Н., Гамин Ю.В., Романцев Б.А. Получение стальных трубчатых изделий переменного сечения по длине // *Черные металлы*. 2019. № 4. С. 37–41.
7. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Ти С.О., Сидорова Т.Ю. Оптимизация процессов формовки и сварки труб большого диаметра с применением математического моделирования // *Металлург*. 2020. № 2. С. 62–72. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00981-2>
8. Осадчий В.Я., Гаас Е.А., Звонарев Д.Ю., Коликов А.П. Математическая модель формоизменения листовой заготовки при производстве сварных труб большого диаметра // *Сталь*. 2014. № 5. С. 63–66. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050088>
9. Коликов А.П., Лелетко А.С., Матвеев Д.Б., Кулютин С.А., Кадильников С.В. Исследование остаточных напряжений в сварных трубах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 11. С. 48–53.
10. Шаталов Р.Л., Шелест А.Е., Медведев В.А. Разработка и исследование электромагнитного устройства неразрушающего контроля механических свойств стальных тонкостенных сосудов // *Металлы*. 2020. № 2. С. 109–115. <https://doi.org/10.1134/S003602952003012X>
11. Shirani Bidabadi B., Moslemi Naeini H., Salmani Tehrani M., Barghikar H. Experimental and numerical study of bowing defects in
1. Shatalov R.L., Medvedev V.A. Regulation of the rolling temperature of blanks of steel vessels in a rolling-press line for the stabilization of mechanical properties. *Metallurgist*. 2020, vol. 63, no. 9–10, pp. 1071–1076. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00925-w>
2. Aleshchenko A.S., Budnikov A.S., Kharitonov E.A. Metal forming during pipes reduction on a three-high rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 10, pp. 756–762. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-756-762>
3. Romantsev B., Goncharuk A., Aleshchenko A., Gamin Y., Mintakhanov M. Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes' production. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 97, no. 9–12, pp. 3223–3230. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2134-3>
4. Abeyrathna B., Rolfe B., Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 92, no. 1–4, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0164-x>
5. Shatalov R.L., Medvedev V.A. Effect of deformed workpiece temperature inhomogeneity on mechanical properties of thin-walled steel vessels during treatment in a rolling and pressing line. *Metallurgist*. 2019, vol. 63, no. 1–2, pp. 76–182. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00807-w>
6. Kadach M.V., Koshmin A.N., Gamin Y.V., Romantsev B.A. Obtaining steel tubular items of variable cross section along their length. *Chernye Metally*. 2019, no. 4, pp. 37–41. (In Russ.).
7. Kolikov A.P., Zvonarev D.Y., Ti S.O., Sidorova T.Y. Optimization of the processes of forming and welding of large-diameter pipes with the help of mathematic simulation. *Metallurgist*. 2020, vol. 64, no. 1–2, pp. 153–168. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00981-2>
8. Osadchii V.Y., Gaas E.A., Zvonarev D.Y., Kolikov A.P. Shaping of thick sheet in the production of welded large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 5, pp. 374–378. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050088>
9. Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D.B., Kulyutin S.A., Kadil'nikov S.V. Investigation of residual stresses in welded pipes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 11, pp. 48–53. (In Russ.).
10. Shatalov R.L., Shelest A.E., Medvedev V.A. Electromagnetic device for nondestructive control of the mechanical properties of thin-walled steel vessels. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020, vol. 2020, no. 3, pp. 259–264. <https://doi.org/10.1134/S003602952003012X>
11. Shirani Bidabadi B., Moslemi Naeini H., Salmani Tehrani M., Barghikar H. Experimental and numerical study of bowing defects

- cold roll-formed, U-channel sections // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 118. P. 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.11.007>
12. Abedian A., Shirani Bidabadi B., Shateri R. Numerical and experimental study of open die forging process design for producing heavy valves // *Int. Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 49–61. <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0374-3>
13. Mirzaali M., Liaghat G.H., Naeini H.M., Seyedkashi S.M.H., Shojae K. Optimization of tube hydroforming process using simulated annealing algorithm // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. P. 3012–3019. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.499>
14. Kasaei M.M., Naeini H.M., Tafti R.A., Tehrani M.S. Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. No. 2. P. 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.012>
15. Park Y., Lee C., Kim J., Kim D., Ahn H., Hwang W. Parametric analysis for minimizing the edge waves in the roll forming // *Int. Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 15. No. 3. P. 5480–5499. <https://doi.org/10.15282/ijame.15.3.2018.6.0421>
16. Будников А.С., Харитонов Е.А., Алешченко А.С., Исхаков Р.В. Влияние безоправочной деформации в трехвалковом стане винтовой прокатки на изменение толщины стенки трубы // *Черные металлы*. 2019. № 12. С. 41–45.
17. Шаталов Р.Л., Медведев В.А., Загоскин Е.Е. Определение механических свойств стальных тонкостенных сосудов по твердости после горячей винтовой прокатки с последующей штамповкой и закалкой // *Черные металлы*. 2019. № 7. С. 36–40.
18. Галкин С.П., Романцев Б.А., Та Д.С., Гамин Ю.В. Ресурсосберегающая технология производства круглого сортового проката из бывших в употреблении осей подвижного железнодорожного состава // *Черные металлы*. 2018. № 4. С. 21–27.
19. Будников А.С., Романцев Б.А., Харитонов Е.А. Определение диаметра валков станов винтовой прокатки // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 9. P. 683 – 688. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-9-683-688>
20. Алешченко А.С., Гамин Ю.В., Чан Б.Х., Цюцюра В.Ю. Особенности износа рабочего инструмента при прошивке жаропрочных сплавов // *Черные металлы*. 2018. № 8. С. 63–70.
21. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алешченко А.С., Гамин Ю.В. Получение полых толстостенных профилей и труб из титановых сплавов методом винтовой прокатки // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015. № 4. С. 38–41. <https://doi.org/10.3103/S1067821215050132>
22. Lee J., Kim D., Quagliato L., Kang S., Kim N. Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 244. P. 304–313. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.022>
23. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in roll forming // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88. No. 9–12. P. 2405–2415. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8962-0>
24. Qiu L., Zhang S., Wang Z., Hu X., Liu X. A robust optimization design method for sheet metal roll forming and its application in roll forming circular cross-section pipe // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 103. No. 5–8. P. 2903–2916. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03773-4>
25. Paralikas J., Salonitis K., Chrysosolouris G. Energy efficiency of cold roll forming process // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 66. No. 9–12. P. 1271–1284. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4405-8>
26. Safdarian R., Moslemi Naeini H. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section // *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 92. P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.002>
27. Nguyen V.B., Wang C.J., Mynors D.J., English M.A., Castellucci M.A. Dimpling process in cold roll metal forming by finite element modelling and experimental validation // *Journal of Manufacturing Processes*. 2014. Vol. 16. No. 3. P. 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.03.001>
- in cold roll-formed, U-channel sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016, vol. 118, pp. 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.11.007>
12. Abedian A., Shirani Bidabadi B., Shateri R. Numerical and experimental study of open die forging process design for producing heavy valves. *Int. Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2018, vol. 12, no. 1, pp. 49–61. <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0374-3>
13. Mirzaali M., Liaghat G.H., Naeini H.M., Seyedkashi S.M.H., Shojae K. Optimization of tube hydroforming process using simulated annealing algorithm. *Procedia Engineering*. 2011, vol. 10, pp. 3012–3019. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.499>
14. Kasaei M.M., Naeini H.M., Tafti R.A., Tehrani M.S. Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 2, pp. 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.012>
15. Park Y., Lee C., Kim J., Kim D., Ahn H., Hwang W. Parametric analysis for minimizing the edge waves in the roll forming. *Int. Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2018, vol. 15, no. 3, pp. 5480–5499. <https://doi.org/10.15282/ijame.15.3.2018.6.0421>
16. Budnikov A.S., Kharitonov E.A., Aleshchenko A.S., Iskhakov R.V. Effect of plugless deformation in screw rolling three-roll mill on the change of tube wall thickness. *Chernye Metally*. 2019, no. 12, pp. 41–45. (In Russ.).
17. Shatalov R.L., Medvedev V.A., Zagoskin E.E. Determination of mechanical properties of steel thinwalled vessels by hardness after hot screw rolling with subsequent stamping and quenching. *Chernye Metally*. 2019, no. 7, pp. 36–40. (In Russ.).
18. Galkin S.P., Romantsev B.A., Ta D.X., Gamin Yu.V. Resource-saving technology for production of round bars from used shaft of rolling railroad stock. *Chernye Metally*. 2018, no. 4, pp. 20–27. (In Russ.).
19. Budnikov A.S., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Determination of rolls diameter for screw-rolling mills. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 683–688. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-9-683-688>
20. Aleshchenko A.S., Gamin Y.V., Chan B.K., Tsyutsyura V.Y. Wear features of working tools during piercing of high-temperature alloys. *Chernye Metally*. 2018, no. 8, pp. 63–70. (In Russ.).
21. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Gamin Y.V. Production of hollow thick-walled profiles and pipes made of titanium alloys by screw rolling. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015, vol. 56, no. 5, pp. 522–526. <https://doi.org/10.3103/S1067821215050132>
22. Lee J., Kim D., Quagliato L., Kang S., Kim N. Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, vol. 244, pp. 304–313. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.022>
23. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in roll forming. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 88, no. 9–12, pp. 2405–2415. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8962-0>
24. Qiu L., Zhang S., Wang Z., Hu X., Liu X. A robust optimization design method for sheet metal roll forming and its application in roll forming circular cross-section pipe. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, vol. 103, no. 5–8, pp. 2903–2916. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03773-4>
25. Paralikas J., Salonitis K., Chrysosolouris G. Energy efficiency of cold roll forming process. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, vol. 66, no. 9–12, pp. 1271–1284. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4405-8>
26. Safdarian R., Moslemi Naeini H. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section. *Thin-Walled Structures*. 2015, vol. 92, pp. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.002>
27. Nguyen V.B., Wang C.J., Mynors D.J., English M.A., Castellucci M.A. Dimpling process in cold roll metal forming by finite element modelling and experimental validation. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014, vol. 16, no. 3, pp. 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.03.001>

28. Sheikh M.A., Palavilayil R.R. An assessment of finite element software for application to the roll-forming process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 180. No. 1–3. P. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.06.009>
29. Chan C.L., Khalid Y.A. Finite element analysis of corrugated web beams under bending // *Journal of Constructional Steel Research*. 2002. Vol. 58. No. 11. P. 1391–1406. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X)
30. Heislitz F., Livatyali H. Simulation of roll forming process with the 3-D FEM code PAM-STAMP // *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. Vol. 59. No. 1–2. P. 59–67. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02287-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02287-X)
31. Li Z.K. The detailed forming behavior of ERW tube- and pipe-making process // *Iron and Steel Technology*. 2018. Vol. 15. No. 8. P. 150–159.
32. Методы расчета калибровок инструмента и энергосиловых параметров процесса производства сварных труб в линии прессов и ТЭСА: сб. задач / С.В. Самусев, А.Н. Фортунатов, Н.А. Фролова, Н.Г. Пашков. Выкса: ВФ МИСиС, 2006. 155 с.
33. Потапов И.Н., Коликов А.П., Друян В.М. Теория трубного производства: учебник для вузов. М.: Metallurgiya, 1991. 424 с.
34. А. с. SU 1745390 A1 СССР. Способ диагностики и настройки валков в клетях трубосварочных агрегатов / Ф.Г. Свидовский, Ю.Т. Ларин, С.В. Самусев и др.; заявл. 10.05.1990; опубл. 07.07.1992. Бюл. № 25.
35. Рымов В.А., Полухин П.И., Потапов И.Н. Совершенствование производства сварных труб. М.: Metallurgiya, 1983. 312 с.
36. Самусев С.В., Фортунатов А.Н. Методы расчета напряженно-деформированного состояния при производстве сварных труб в линии ТЭСА: сб. задач. Выкса: ВФ МИСиС, 2008. 135 с.
37. Технология трубного производства: учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. М.: Интернет Инжиниринг, 2002. 640 с.
38. Самусев С.В., Алешенко А.С., Фадеев В.А. Моделирование процесса непрерывной формовки сварных прямошовных труб на базе «ТЕНАЖЕРА-ТЭСА 10-50» // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 5. С. 378–384. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-378-384>
28. Sheikh M.A., Palavilayil R.R. An assessment of finite element software for application to the roll-forming process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol. 180, no. 1-3, pp. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.06.009>
29. Chan C.L., Khalid Y.A. Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *Journal of Constructional Steel Research*. 2002, vol. 58, no. 11, pp. 1391–1406. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X)
30. Frank Heislitz, Haydar Livatyali. Simulation of roll forming process with the 3-D FEM code PAM-STAMP. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, vol. 59, no. 1–2, pp. 59–67. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02287-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02287-X)
31. Li Z.K. The detailed forming behavior of ERW tube- and pipe making process. *Iron and Steel Technology*. 2018, vol. 15, no 8, pp. 150–159.
32. Samusev S.V., Fortunatov A.N., Frolova N.A., Pashkov N.G. *Methods for Calculating Tool Calibrations and Energy Parameters of Welded Pipes Production in the Line of Presses and ERW: Problem Book*. VF MISiS, 2006, 155 p. (In Russ.).
33. Potapov I.N., Kolikov A.P., Druyan V.M. *Theory of Pipe Production: Textbook for Universities*. Moscow: Metallurgiya, 1991, 424 p. (In Russ.).
34. Svidovskii F.G., Larin Yu.T., Samusev S.V., Pavlova M.A. etc. *Method for diagnostics and adjustment of rolls in stands of pipe-welding units*. Certificate of authorship USSR no. SU 1745390 A1. (In Russ.).
35. Rymov V.A., Polukhin P.I., Potapov I.N. *Improvement of Welded Pipes Production*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 312 p. (In Russ.).
36. Samusev S.V., Fortunatov A.N. *Methods for Calculating Stress-Stain State at Welded Pipes Production in the ERW Line: Problem Book*. VF MISiS, 2008, 135 p. (In Russ.).
37. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A., Samusev S.V. *Pipe Production Technology: Textbook for Universities*. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002, 640 p. (In Russ.).
38. Samusev S.V., Aleshchenko A.S., Fadeev V.A. Simulation of the process of continuous forming of straight-seam welded pipes on the basis of “TESA 10-50 TRAINER”. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 378–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-378-384>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Владимирович Самусев, д.т.н., профессор кафедры технологии и оборудования трубного производства, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Алексей Владимирович Кондрушин, магистр, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Виктор Александрович Фадеев, ассистент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: fdv_viktor@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4938-7130

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei V. Samusev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Technology and Equipment for Pipe Production”, National University of Science and Technology “MISIS”

Aleksei V. Kondrushin, Master Student, National University of Science and Technology “MISIS”

Viktor A. Fadeev, Assistant, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: fdv_viktor@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4938-7130

Поступила в редакцию 5.04.2020

После доработки 3.08.2020

Принята к публикации 25.12.2020

Received 5.04.2020

Revised 3.08.2020

Accepted 25.12.2020