

УДК 621.774.2

«МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ФОРМОВКИ СВАРНЫХ ПРЯМОШОВНЫХ ТРУБ НА БАЗЕ «ТРЕНАЖЕРА–ТЭСА 10-50»

*Самусев С.В., д.т.н., профессор кафедры технологии и оборудования трубного производства
Алещенко А.С., к.т.н., доцент кафедры технологии и оборудования трубного производства
Фадеев В.А., инженер (fdv_viktor@mail.ru)*

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

Аннотация. Одним из наиболее продуктивных и надежных методов исследования процессов обработки металлов давлением является прямое физическое моделирование на реальном металле. Ограничения этого метода применительно к производству сварных труб, как правило, связаны только с отсутствием специализированного оборудования для моделирования процесса непрерывной валковой формовки. В 2014 г. на кафедре обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС» была создана лаборатория моделирования наиболее распространенных процессов формовки сварных прямошовных труб, получаемых непрерывными или дискретными способами. Лаборатория включает в себя специализированный «ТРЕНАЖЕР ТЭСА 10-50» (ТРЕНАЖЕР), позволяющий моделировать непрерывные процессы получения сварных труб малого диаметра. На ТРЕНАЖЕРЕ можно моделировать процессы непрерывной формовки труб малого и среднего диаметра по основным производственным схемам трубоэлектросварочных цехов: получения сварных труб круглого сечения из ленты, профилированных труб из листовой заготовки и профилированных труб из предварительно сформованной круглой или овальной заготовки. В исследовательской части рассмотрен очаг деформации трубной заготовки, включающей внеконтактный очаг сворачивания, контактный очаг деформации и участок распушинивания. Первоначально были рассчитаны параметры формоизменения трубной заготовки в монотонном и валковом очагах формовки по принятым методикам. Затем проведено сравнение полученных результатов по динамике изменения ширины заготовки по фиксированным сечениям очага деформации. Далее, проверены параметры валкового инструмента на соответствие рассчитанных размеров. Для первой валковой клетки непрерывного очага был организован и проведен эксперимент для тех же условий, но в реальном валковом очаге. Полученный экспериментальный образец, размеченный по восьми сечениям, был обмерен после выхода заготовки из приводной клетки и полученные данные занесены в таблицу. Анализ проведенных результатов показал, что формоизменение параметров поперечных сечений соответствует принятым положениям о характере геометрии заготовки в валковых приводных калибрах. Расхождение теоретических и экспериментальных данных для валкового очага не превышает 1,5 %.

Ключевые слова: непрерывная формовка, ТРЕНАЖЕР, ТЭСА, сварная труба, валковая формовка, моделирование, формовочный стан, валковый калибр.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-378-384

В НИТУ «МИСиС» с 70-х годов прошлого века на кафедре обработки металлов давлением (ОМД) начали изучать процесс непрерывного производства прямошовных сварных труб малого и среднего сортамента в линии непрерывных ТЭСА как в лаборатории кафедры, так и на трубных заводах РФ. Большое количество модернизаций и реконструкций было выполнено в трубоэлектросварочных цехах различных заводов. Были разработаны и практически опробованы новые схемы и способы производства сварных труб малого и среднего диаметра [1, 2].

Влияние параметров очагов формовки на качество трубной заготовки изучалось многими авторами, но экспериментальное исследование не охватывало всех проблемных вопросов, поскольку ранее эксперименты проводили непосредственно на промышленных станах. Ограничения применительно к производству сварных труб, как правило, связаны только с отсутствием специализированного оборудования для моделирования

процесса непрерывной валковой формовки [2 – 6]. Это создавало определенные трудности, поскольку в программах работы ТЭСА не предусматривались длительные простои. В настоящее время, с пуском современных валковых ТЭСА, вопрос физического моделирования процесса непрерывной формовки сварных труб остается актуальным. В 2014 г. на кафедре ОМД был разработан, смонтирован и отлажен «ТРЕНАЖЕР-ТЭСА 10-50».

На рис. 1 представлена компоновка главной линии «ТРЕНАЖЕРА-ТЭСА 10-50» для непрерывной формовки сварных прямошовных труб в лаборатории моделирования кафедры. В конструкции ТЭСА реализован технологический валковый инструмент, выполненный по однорадиусной калибровке. Такая калибровка сегодня является наиболее распространенной (65 – 75 % станков РФ ее используют) и хорошо зарекомендовала себя в производственных условиях.

Технические параметры «ТРЕНАЖЕРА-ТЭСА 10-50» представлены ниже:

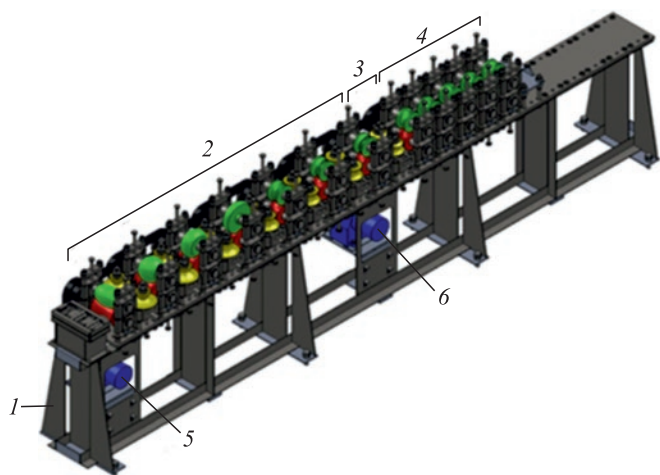


Рис. 1. Общая компоновка «ТРЕНАЖЕРА-ТЭСА 10-50»: 1 – станина; 2 – формовочный блок; 3 – сварочный узел; 4 – калибровочно-профилировочный блок; 5 – привод формовочного блока; 6 – привод калибровочно-профилировочного блока

Fig. 1. Overall configuration of the “TESA 10-50 TRAINER”: 1 – bed; 2 – molding block; 3 – welding unit; 4 – calibration-profiling unit; 5 – drive of the molding block; 6 – drive of the calibration-profiling unit

Диаметр труб и профилей, мм	10 – 50
Толщина стенки, мм	До 3
Скорость формовки (калибровки), м/мин	0,5 – 10
Усилие металла на валки, кН:	
горизонтальное	1 – 10
вертикальное	2 – 10
Тянущее усилие приводной клетки, кН	150
Число рабочих клеток:	
горизонтальные (открытого типа)	4
горизонтальные (закрытого типа)	3
вертикальные (эджерные)	7
Тип привода	Цепной
Мощность двигателя, кВт	0,75
Межклетевое расстояние, мм	100 – 200

На базе главной линии ТРЕНАЖЕРА (см. рис. 1) могут быть реализованы основные производственные схемы по типовым компоновкам рабочих клеток станов ТЭСА (рис. 2).

ТРЕНАЖЕР позволяет создавать как типовые, так и нестандартные компоновки линий ТЭСА. Это достигается путем размещения рабочих клеток в определенной последовательности. Спроектированная конструкция клеток тренажера обеспечивает совместимость с разными комплектами сменного рабочего инструмента, что открывает возможности физического моделирования и исследования процессов формовки, сварки, калибровки, редуцирования и профилирования сварных труб (см. рис. 2).

Для исследования процесса непрерывного формоизменения определяли геометрические параметры заготовки с целью изучения процесса формоизменения при формовке, калибровке, редуцировании, профилировании, обеспечивающие получение качественной продукции.

Для теоретического и экспериментального исследования был рассчитан и изготовлен комплект валкового инструмента на трубу размером 50×2 мм.

В работе представлена калибровка валков для участка открытых калибров ТРЕНАЖЕРА. Расчет параметров валков участка открытых клеток провели по методике, представленной в работах [6, 7] (табл. 1).

Для теоретических исследований образец длиной 660 мм был размечен на восемь фиксированных сечений по характерным участкам очага деформации. Параметры поперечного сечения трубной заготовки для данного очага рассчитывали по схеме, показанной на рис. 3. Исследования проводили для очага первой приводной клетки ТРЕНАЖЕРА. В табл. 2 представлены параметры очагов сворачивания.

Геометрические параметры очага деформации для первой клетки (вид сверху) показаны на рис. 4.

Монотонный очаг сворачивания обеспечивает постепенное изменение основных геометрических пара-

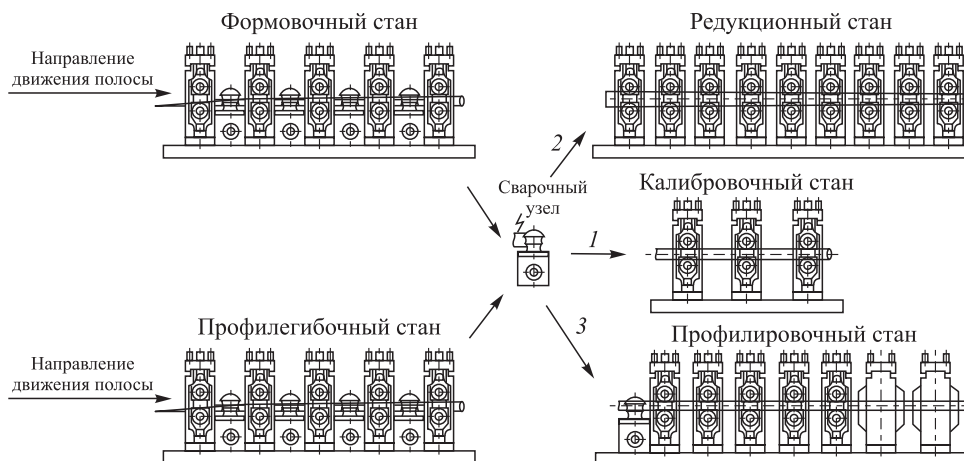


Рис. 2. Типовые компоновки станов ТЭСА для производства сварных труб

Fig. 2. Typical configurations of TESA mills for the production of electric welded pipes

Таблица 1

Параметры валков открытых калибров

Table 1. Parameters of open calibers rolls

Номер валка	$R_{1н}^n$, мм	$R_{1в}^n$, мм	$R_{1с}^n$, мм	ϕ_1 , град	$A_{1н}^n$, мм	H_i^n , мм
1	147,13	143,13	145,13	67,5	163,49	24,79
2	73,57	69,57	71,57	135,0	135,93	45,40
3	49,04	45,04	47,04	202,5	96,20	58,60
4	36,78	32,78	34,78	270,0	52,02	62,78

метров поперечных сечений [1, 7 – 9]. Траектории перемещения фиксированных точек по ширине изменяются плавно, профиль заготовки постепенно увеличивает кривизну по мере приближения к валковому калибру первой клетки. Как показали ранее проведенные теоретические и экспериментальные исследования формовки с анализом контактного взаимодействия инструмента и валков [1, 10 – 12], такая траектория реально воспроизводима только специальным валково-роликовым инструментом формовочного оборудования и обеспечивает равномерное изменение (увеличение) деформаций и напряжений по мере формовки профиля заготовки. Такие очаги деформации за счет контактных условий валково-роликового инструмента с заготовкой исключают локальные всплески продольных деформаций по кромкам с образованием гофры (волны) кромки или неконтролируемые поперечные смещения профиля.

Параметры формовки фиксировали по зависимости изменения ширины заготовки по длине очага сворачивания по размеченным сечениям. Расчеты показали, что ширина заготовки равномерно уменьшается до четырех-пяти контактной зоны очага деформации на 9,6 мм, затем равномерно распуружинивается на 4,8 мм.

Характер формоизменения параметров заготовки в валковом очаге исследован многими авторами с учетом условий контактного взаимодействия заготовки

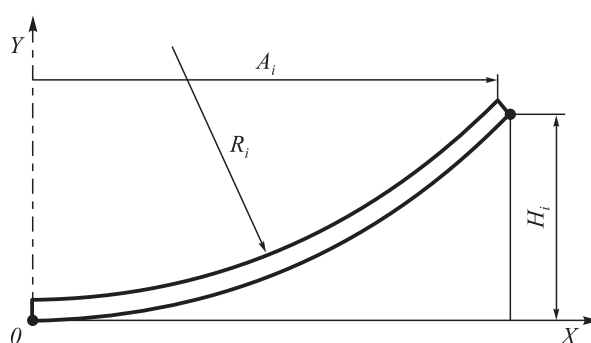


Рис. 3. Параметры поперечного сечения заготовки в очаге сворачивания первой формовочной клетки:

A_i – расстояние между кромками заготовки для i -го сечения очага, H_i – высота профиля, R_i – радиус формовки заготовки

Fig. 3. Parameters of cross section of the billet in forming zone of the first molding stand:

A_i – distance between the edges of the billet for the i -th section; H_i – height of the profile; R_i – molding radius of the billet

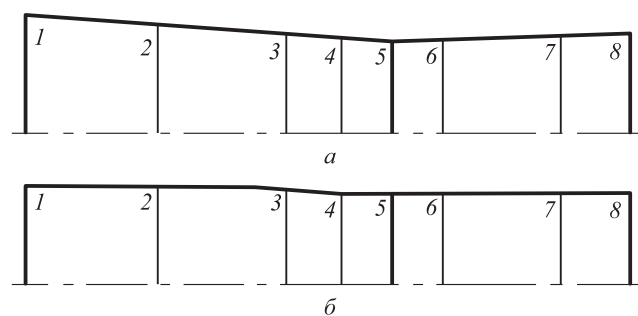


Рис. 4. Геометрические параметры очага сворачивания в первой клетки:
 a – монотонный очаг сворачивания; b – валковый очаг сворачивания

Fig. 4. Geometric parameters of the forming zone in the first stand:
 a – monotone forming zone, b – roll forming zone

с профилированными валками и интенсивности подгиба по длине очага [1, 2, 13 – 16]. Общим мнением является то, что валковый очаг имеет три характерных участка формоизменения и для каждого участка при-

Таблица 2

Параметры очагов сворачивания

Table 2. Parameters of the forming zone

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8
Вид очага	Монотонный очаг сворачивания							
A_i , мм	172,8	169,4	166,73	163,49	164,35	165,82	167,46	169,2
H_i , мм	2	9,5	15,2	24,79	24,3	24,0	23,7	23,26
R_i , мм	–	382,33	236,21	147,17	151,10	155,21	159,76	165,48
Вид очага	Валковый очаг сворачивания							
A_i , мм	172,8	171,1	169,2	163,49	164,4	165,1	166,7	169,2
H_i , мм	2	14,87	19,83	24,79	24,44	23,95	23,70	23,26
R_i , мм	–	248,6	186,4	147,1	150,5	154,2	158,5	165,5

суши свои особенности изменения параметров в зависимости от типов калибровки, компоновки приводных и холостых рабочих клетей, особенностей контактного взаимодействия инструмента и заготовки.

Первый участок неконтактной деформации условно можно разделить на три зоны. Первая зона по сечениям 1 – 2 характерна тем, что при валковой формовке изменение параметров профиля заготовки практически не происходит, так как влияние силовых факторов от контактного очага приводного калибра незначительно в начале участка. В следующей зоне сечений 2 – 3 интенсивность изгиба возрастает, поскольку возрастают тянущие усилия от клетки, влияющие на осевое формоизменение продольных волокон по ширине заготовки. Параметры профиля изменяются плавно, на уровне изменений монотонного очага. В последней зоне первого участка (сечения 3 – 4) происходит основное интенсивное формоизменение на относительно небольшой длине участка (56 мм). Это объясняется возрастанием тянущих усилий и интенсивным изменением поперечных параметров непосредственно перед входом заготовки в контактный очаг деформации валкового калибра. Все параметры по ширине, высоте и кривизне доформируются до параметров профиля калибра. Такая интенсивная формовка является причиной всплеска продольных деформаций кромок заготовки и может привести к возникновению гофров или других пластических отклонений траектории кромки от заданной симметричной схемы [1, 2, 17 – 20].

В настоящей работе теоретический расчет проведен до экспериментальных исследований. Одной из задач данной работы является проверка известных теоретических моделей расчета параметров валкового очага формовки по параметрам, полученным экспериментально на ТРЕНАЖЕРЕ.

Анализ экспериментальных данных для валкового очага по динамике изменения ширины профиля показал, что на первом участке (347 мм) при переходе от первого сечения (исходная заготовка 172,8 мм) ко второму ширина уменьшилась на 1,7 мм (171,1 мм). При переходе со второго сечения в третье уменьшение составило 1,9 мм (169,2 мм). На третьей зоне размер ширины уменьшился на 5,7 мм (163,49 мм).

На втором участке контактного взаимодействия валков с заготовкой (110 мм) ширина профиля меняется незначительно (на 1 мм).

На третьем участке (203 мм) в первой зоне распуливания ширина увеличилась на 0,7 мм, а на втором участке на 1,6 мм и в конце участка ширина увеличилась на 2,5 мм. При этом максимальная интенсивность изгиба заготовки достигнута в сечениях 3 – 4, на расстоянии в 56 мм, где ширина уменьшилась на 6 мм.

Для осуществления экспериментальной формовки проводили проверку габаритов валкового инструмента участка открытых калибров.

На рис. 5 представлена схема проверки новых валков первой клетки перед экспериментами. Подготовка валкового инструмента к экспериментам представлена на примере верхнего валка первого калибра полного охвата. Габаритные размеры валка сравнили с расчетными данными. Профиль валка проверяли приложением к профилированной части специального шаблона, изготовленного по расчетному радиусу. По значениям зазоров между калиброванной частью валка и поверхностью шаблона определяли качество рабочей поверхности валка. Зазоры между поверхностью валка и шаблоном не должны превышать допустимых пределов. В данном случае, поскольку инструмент был новым, зазоров не наблюдали. Остальные рабочие калибры второй – четвертой клетей были проверены аналогично (в материалах статьи не представлены).

Проведение экспериментальной формовки в калибре полного охвата заключалось в следующем. На исходную листовую заготовку, размеченную на восемь сечений аналогично теоретическим исследованиям, наносили поперечные риски с заданным шагом. Заготовку формовали в первой клетке ТРЕНАЖЕРА. Экспериментальный образец заготовки представлен на рис. 6.

Данные по эксперименту в валковом очаге первой клетки представлены в табл. 3.

Динамика изменения ширины заготовки в фиксированных сечениях близка к расчетным данным. Отклонения расчетных и экспериментальных значений лежат в диапазоне 0,5 – 1,5 %.

В настоящей работе представлены расчетные и экспериментальные данные по изменениям ширины профиля заготовки при формовке в валковом очаге первой клетки. Показатели по динамике изменений высоты профиля, радиусов профиля по фиксированным сечениям

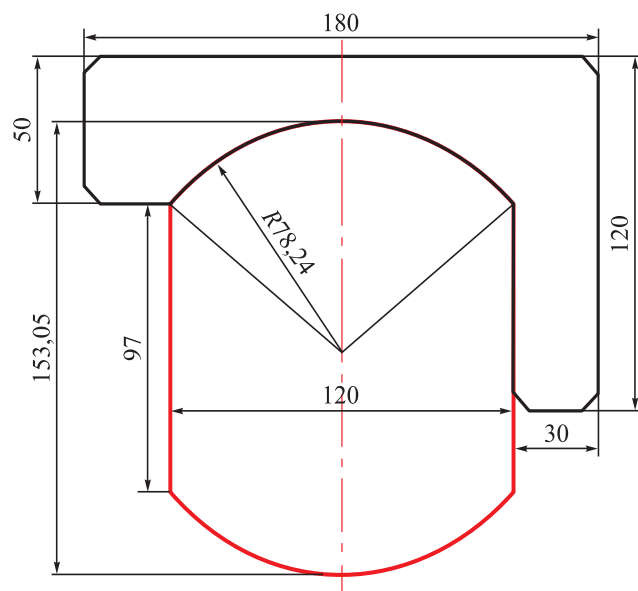


Рис. 5. Верхний валок первой формовочной клетки с шаблоном

Fig. 5. Top roll of the 1st molding stand with a template



Рис. 6. Экспериментальный образец с длинами по участкам

Fig. 6. Experimental sample with lengths of areas

Таблица 3

Параметры заготовки после эксперимента

Table 3. Parameters of the billet after the experiment

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8
A_i , мм	172,8	169,0	168,2	163,49	163,4	164,2	165,9	169,1
H_i , мм	2,00	14,34	19,21	24,6	24,54	23,88	23,2	22,8
R_i , мм	–	248,9	187,1	147,1	151,1	154,7	158,8	166,3

в работе не рассматривались. Эти сведения, а также данные по изменениям координатной сетки заготовки, позволят сравнивать показатели по напряженно-деформированному состоянию в фиксированных узлах координатной сетки, а также рассчитывать и анализировать энергосиловые параметры.

Выводы. Представлены технические характеристики и технологические возможности ТРЕНАЖЕРА для моделирования процессов производства сварных прямошовных труб в линия ТЭСА с различной компоновкой деформационных станов.

Рассмотрен очаг деформации первой клетки формовочного стана для трубы размером 50×2 мм. Выполнены расчеты параметров очага сворачивания для монотонного и валкового очагов.

Проведена экспериментальная формовка трубной заготовки для трубы размером 50×2 мм для валкового очага деформации первой клетки ТРЕНАЖЕРА и сравнительный анализ параметров формовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рымов В.А., Полухин П.И., Потапов И.Н. Совершенствование производства сварных труб. – М.: Металлургия, 1983. – 286 с.
2. Технологии трубного производства / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 640с.
3. Walker T.R., Pick R.J. Developments in the geometric modeling of an ERW pipe skelp // Journal of Materials Processing Tech.1991. No. 25 (1). P. 35 – 54.

4. Юсупов В.С., Колобов А.В., Акопян К.Э. и др. Совершенствование технологии производства электросварных прямошовных труб. Часть I // Сталь. 2015. № 8. С. 44 – 50.
5. Хлыбов О.С., Новокшенов Д. Н., Соколова О.В., Лепестов А.Е. Моделирование процессов валковой формовки труб АО «Выксунский металлургический завод» // Сталь. № 5. 2015. С. 67 – 70.
6. Самусев С.В., Жигулев Г.П., Фадеев В.А., Манахов К.С. Моделирование процесса формоизменения трубной заготовки на специализированной профилигибочной установке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 3. С. 154 – 158.
7. 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. No. 214 (2). P. 190 – 199.
8. Седлмайер А., Скрипкин А. COPRA RollForm: линейная формовка cage forming //САПР и графика. 2009. № 3. С. 44 – 48.
9. Серавкин А.А., Скрипкин А.Ю., Соколова О.В. Моделирование формовки сварных прямошовных труб среднего диаметра // Производство проката. 2007. № 2. С. 35 – 37.
10. Han Z.-W., Liu C., Lu W.-P. etc. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes // Journal of Materials Processing Technology. 2004. No. 145 (3). P. 311 – 316.
11. Abeyrathna B., Rolfe B., Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. No. 92 (1–4). P. 1 – 12.
12. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in roll forming // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. No. 88 (9 – 12). P. 2405 – 2415.
13. Самусев С.В., Захаров Д.В., Маршалкин Е.Л., Борисевич В.Г. Совершенствование технологии производства тонкостенных

труб и оболочек малого диаметра // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 7. С. 36 – 38.

14. Самусев С.В., Пашков Н.Г., Зелова Л.В., Соловьев Д.М. Разработка эффективных режимов калибровки прямошовных сварных труб малого и среднего диаметров // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 9. С. 32 – 34.
15. Iguchi K., Kuriyama Y., Moroi N. etc. Deformation behavior of high strength steel sheet during roll forming of electric resistance welded pipe // Steel Research International. 2012. SPL. ISSUE. P. 927 – 930.
16. Paralikas J., Salonitis K., Chryssolouris G. Energy efficiency of cold roll forming process // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 66. No. 9 – 12. P. 1271 – 1284.
17. Pantan S.M., Zhu S.D., Duncan J.L. Geometric constraints on the forming path in roll forming channel sections // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 1992. No. 206 (2). P. 113 – 118.
18. Cai Liu, Zhiwu Han, Lele Zhang, Weiping Lu. Numerical modelling of the roll forming process of channel steel // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). 1999. No. 12 (3). P. 173 – 177.
19. Pantan S.M., Zhu S.D., Duncan J.L. Fundamental deformation types and sectional properties in roll forming // International Journal of Mechanical Sciences. 1994. No. 6 (8). P. 725 – 735.
20. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. An extension of the flower pattern diagram for roll forming // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 83. No. 9 – 12. P. 1683 – 1695.

Поступила 3 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 5, pp. 378–384.

SIMULATION OF THE PROCESS OF CONTINUOUS FORMING OF STRAIGHT-SEAM WELDED PIPES ON THE BASIS OF “TESA 10-50 TRAINER”

S.V Samusev, A.S. Aleshchenko, V.A. Fadeev

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. One of the most productive and reliable methods for studying the processes of metal forming is direct physical modeling on a real metal. The limitations of this method, as applied to the production of electric welded pipes, are generally related only to the lack of specialized equipment for modeling the continuous roll forming process. In 2014, a laboratory for modeling the most common processes of forming welded straight-seam pipes produced by continuous or discrete methods was established at the “Metal Forming” Department of NUST “MISIS”. The laboratory includes a specialized “TESA 10-50 TRAINER” (TRAINER), which allows simulation of continuous processes of electric welded pipes of small diameter. At the TRAINER, it is possible to simulate the processes of continuous forming of pipes of small and medium diameter by the basic production schemes of the pipe-electric welding manufactory: obtaining welded pipes of circular cross-section from strand; production of profiled pipes from sheet billet; obtaining profiled pipes from a preformed round or oval billet. In the research part of the article, the focus of deformation of the pipe blank, including the non-contact focus of the folding, the contact deformation center and the sprung portion, is considered. Initially, the shaping parameters of pipe billet in monotonous and roll forming centers were calculated by the adopted methods. The obtained results were compared by dynamics of the change in the width of billet from fixed sections of the deformation center. Further, the parameters of the roller tool were checked for compliance with the calculated dimensions. For the first roll stand of a continuous focus, an experiment was organized and conducted for the same conditions, but in a real roll center. The obtained experimental sample, marked out in eight sections, was measured after the billet had left the drive stand and the obtained data are listed in the table. Analysis of the results showed that the shape change of the cross-section parameters corresponds to the accepted provisions on geometry nature of the billet in the roller drive calibers. The discrepancy between the theoretical and experimental data for the roll center does not exceed 1.5 %.

Keywords: continuous molding, TRAINER, TESA, welded pipe, roller molding, modeling, forming mill, roll caliber.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-378-384

REFERENCES

1. Rymov V.A., Polukhin P.I., Potapov I.N. *Sovershenstvovanie proizvodstva svarnykh trub* [Improving the production of welded pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 286 p. (In Russ.).
2. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A. Samusev S.V. *Tekhnologii trubnogo proizvodstva* [Technology of pipe production]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002, 640 p. (In Russ.).
3. Walker T.R., Pick R.J. Developments in the geometric modeling of an ERW pipe skelp. *Journal of Materials Processing Tech.* 1991, no. 2 (1), pp. 35–54.
4. Yusupov V.S., Kolobov A.V., Akopyan K.E., Seleznev M.S., Somnin M.A. Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 1. *Steel in Translation.* 2015, vol. 45, no. 8, pp. 598–604.
5. Khlybov O.S., Novokshonov D. N., Sokolova O.V., Lepestov A.E. Simulation of processes of roll forming of pipes at JSC “Vyksa Metallurgical Plant”. *Stal’.* 2015, no. 5, pp. 67–70. (In Russ.).
6. Samusev S.V., Zhigulev G.P., Fadeev V.A., Manakhov K.S., Simulation of forming pipe billet at specialized forming installation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2016, vol. 59, no. 3, pp. 154–158. (In Russ.).
7. 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, no. 214 (2), pp. 190–199.
8. Sedlmaier A., Skripkin A. COPRA RollForm: linear molding of cage forming. *SAPR i grafika.* 2009, no. 3, pp. 44–48. (In Russ.).
9. Seravkin A.A., Skripkin A.Yu., Sokolova O.V. Modeling of the molding of welded straight-seam medium-diameter pipes. *Proizvodstvo prokata.* 2007, no. 2, pp. 35–37. (In Russ.).
10. Han Z.-W., Liu C., Lu W.-P., Ren L.-Q., Tong J. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes. *Journal of Materials Processing Technology.* 2004, no. 145(3), pp. 311–316.
11. Abeyrathna B., Rolfe B., Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2017, no. 92 (1-4), pp. 1–12.
12. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in roll forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2017, no. 88 (9-12), pp. 2405–2415.
13. Samusev S.V., Zakharov D.V., Marshalkin E.L., Borisevich V.G. Improving the manufacturing technology for thin-walled pipe and small-diameter shells. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2007, no. 7, pp. 36–38. (In Russ.).
14. Samusev S.V., Pashkov N.G., Zelova L.V., Solov’ev D.M. Rational conditions development for low- and medium diameter seamless tube groove rolling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metal-*

- lurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, no. 9, pp. 32–34. (In Russ.).
15. Iguchi K., Kuriyama Y., Moroi N., Hama T., Takuda H. Deformation behavior of high strength steel sheet during roll forming of electric resistance welded pipe. *Steel Research International*. 2012, Spec. Issue, pp. 927–930.
 16. Paralikas J., Salonitis K., Chryssolouris G. Energy efficiency of cold roll forming process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, vol. 66, no. 9-12, pp. 1271–1284.
 17. Panton S.M., Zhu S.D., Duncan J.L. Geometric constraints on the forming path in roll forming channel sections. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 1992, no. 206 (2), pp. 113–118.
 18. Cai Liu, Zhiwu Han, Lele Zhang, Weiping Lu. Numerical modeling of the roll forming process of channel steel. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 1999, no. 12 (3), pp. 173–177.
 19. Panton S.M., Zhu S.D., Duncan J.L. Fundamental deformation types and sectional properties in roll forming. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1994, no. 36 (8), pp. 725–735.
 20. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. An extension of the flower pattern diagram for roll forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 83, no. 9-12, pp. 1683–1695.

Information about the authors:

S.V Samusev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Technology and Equipment for Pipe Production”

A.S. Aleshchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Metal Forming”

V.A. Fadeev, Engineer (fdv_viktor@mail.ru)

Received July 3, 2017