

УДК 621.774.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ПРОФИЛЕГИБОЧНОЙ УСТАНОВКЕ

Самусев С.В., д.т.н., профессор кафедры технологии и оборудования
трубного производства

Жигулев Г.П., к.т.н., доцент, эксперт кафедры технологии и оборудования
трубного производства

Фадеев В.А., инженер (fdv_viktor@mail.ru)

Манахов К.С., магистрант

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

Аннотация. Представлена методика и результаты измерения профиля трубной заготовки для технологического процесса формовки листовой заготовки. При производстве сварных прямошовных труб большого диаметра зафиксировано явление отрыва заготовки от деформирующего инструмента в зоне очага деформации. Указанное явление отрыва исследовано на гибочной установке. Эксперименты показали, что заготовка в зоне отставания от рабочего инструмента имеет сложную кривизну профиля. Разработана программа расчета координат и радиусов кривизны поверхности заготовки по фотографиям очага деформации. Получена кривая профиля заготовки с учетом изменения кривизны отрыва от пуансона. Явление отрыва использовано при расчетах радиуса кривизны после разгрузки.

Ключевые слова: трубная заготовка, электросварная труба, шаговая формовка, очаг деформации, полный контакт, отрыв заготовки, пуансон, изгиб заготовки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-154-158

Одним из наиболее продуктивных и надежных методов исследования процессов обработки металлов давлением является физическое моделирование на реальном металле. Ограничения моделирования связаны с отсутствием специализированного оборудования для конкретного процесса и математических разработок, позволяющих адекватно описать процесс формоизменения. На кафедре технологии и оборудования трубного производства НИТУ «МИСиС» ведутся работы по моделированию наиболее распространенных процессов формовки сварных прямошовных труб большого диаметра [1]. Физическое моделирование осуществляется на профилегибочной установке РВТ 25 фирмы Profilbiegetechnik AG (Швейцария), которая позволяет моделировать существующие на трубных заводах (ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Ижорский трубный завод», ОАО «Челябинский трубопрокатный завод», ОАО «Волжский трубный завод») дискретные процессы формовки труб большого диаметра: UOE, Roll-bedding, JCOE. Для экспериментальных исследований разработана методика, позволяющая моделировать дискретные процессы формовки труб большого диаметра.

Основные технические характеристики гибочной машины РВТ 25 приведены ниже:

Число валков	Максимальная ширина заготовки, мм	Диаметр валков, мм	Расстояние между валками, мм	Максимальный крутящий момент, Н·м	Усилие гидроцилиндра, т
3	300	110 – 300	200 – 1000	300	27

Гибочная машина состоит из сварного корпуса, на котором крепятся рабочие механизмы, обеспечивающие процесс гибки различных профилей. Все валки (два опорных и один гибочный) данной установки выполнены консольно и приводятся во вращение от электродвигателей через цепные передачи. С целью фиксации заготовки на входе и выходе из очага деформации в горизонтальной плоскости в конструкции машины предусмотрены боковые ролики. Изгиб заготовки может осуществляться либо только за счет начального перемещения гибочного валка, либо за счет протяжки ее между вращающимися опорными валками.

Для исследования процесса формоизменения на образец предварительно наносили разметку, которая фиксировалась фотосъемкой при нагрузке и после распруживания [2].

При изгибе зафиксировали в очаге деформации два случая: полный контакт заготовки с поверхностью ги-

бочного вала (рис. 1, *a*), а также отрыв заготовки от гибочного вала (неполный контакт) (рис. 1, *б*). Указанные виды контактного взаимодействия заготовки и гибочного инструмента характерны как для формовки на прессах, так и для Roll-bedding процесса [3]. Явление отрыва практически не учтено в работах, посвященных этому вопросу, и зависит от величины нажатия гибочного вала (величина обжатия) и других параметров настройки.

Схема очага деформации, моделирующая условие полного контакта заготовки и инструмента, представлена на рис. 2, *a*, а условие неполного контакта – на рис. 2, *б* [4 – 6]. Очаг деформации согласно рис. 2 симметричный. Система координат прямоугольная. Ось *x* проходит через центры опорных валков, ось *y* – через центр межосевого расстояния. Участки заготовки

ABMKC (см. рис. 2, *a*) и *aABMKCb* (см. рис. 2, *б*) являются жесткими, недеформированными. Вследствие симметрии нагруженная заготовка изгибается по дуге окружности [7 – 12].

Параметры настройки очага деформации для изгиба заготовки из стали 45 (см. рис. 2) представлены ниже, где $2L$ – расстояние между опорными валками, h_a, h_b – ход гибочного вала, S – толщина заготовки, R_n, r_b – радиусы гибочного вала и опорных валков:

$R_n, \text{мм}$	$r_b, \text{мм}$	$S, \text{мм}$	$h_a, \text{мм}$	$h_b, \text{мм}$	$L, \text{мм}$
137,5	97,5	6	27,19	18,08	130

Для замеров геометрических параметров заготовки в процессе формоизменения производилась фотосъем-

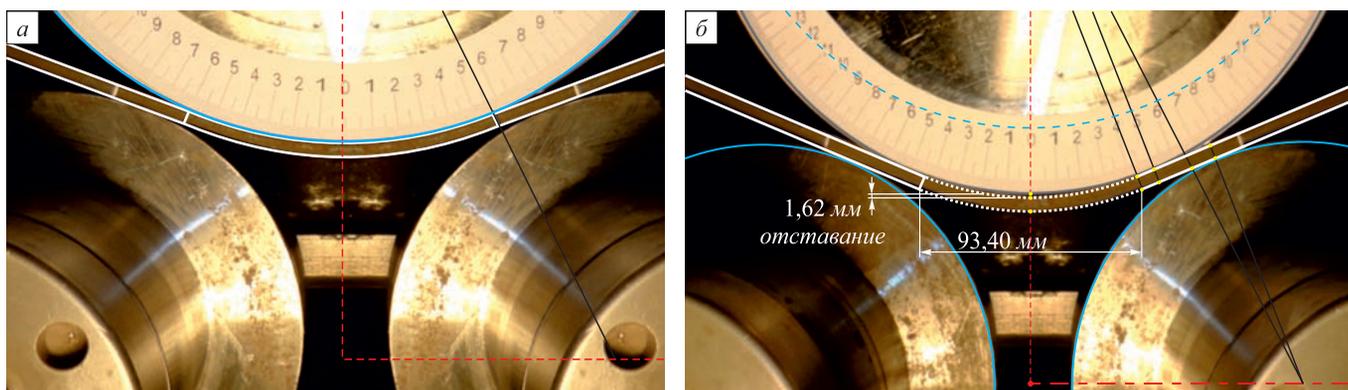


Рис. 1. Виды контактного взаимодействия заготовки с валком в очаге деформации при изгибе: *a* – полный контакт ($h_a = 18,30 \text{ мм}$); *б* – отрыв заготовки ($h_b = 27,19 \text{ мм}$)

Fig. 1. Types of contact interaction of the blank with the roll in the deformation zone at bending: *a* – full contact ($h_a = 18.30 \text{ мм}$); *б* – workpiece separation ($h_b = 27.19 \text{ мм}$)

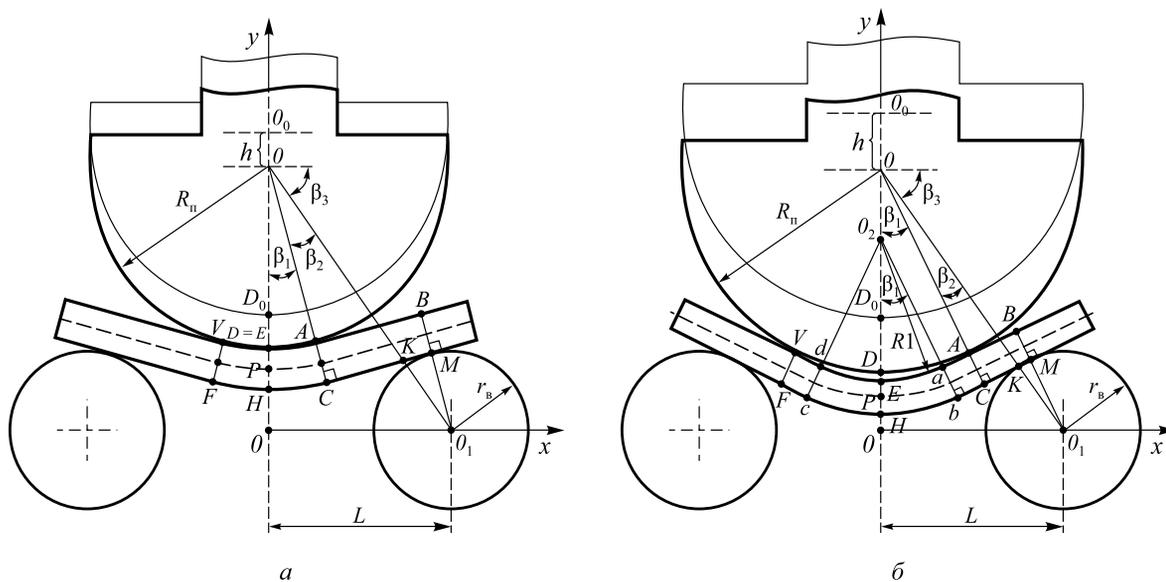


Рис. 2. Схема очага деформации при изгибе: *a* – полный контакт заготовки с гибочным валком; *б* – отрыв заготовки от гибочного вала

Fig. 2. Scheme of the deformation zone at bending: *a* – full contact with the workpiece bending roll; *б* – workpiece separation from the bending roll

Сводная таблица маркировки точек и значений координат (см. рис. 2)

Table 1. Summary table of the marking points and coordinate values (Fig. 2)

Точка	Расчетные координаты, мм		Экспериментальные координаты, мм		Величина отклонения, %	
	x	y	x	y	Δx	Δy
O_o	0	241,00	0	241,20	–	–0,08
O	0	213,81	0	214,01	–	–0,09
A	50,04	85,74	51,95	86,53	–3,68	–0,91
D	0	76,31	0	76,51	–	–0,26
M	79,52	90,81	78,26	90,25	1,61	0,63
K	68,48	86,50	68,45	86,68	0,04	–0,21
B	77,33	96,40	75,87	96,13	1,93	0,28

ка. Обработка экспериментальных фотографий заготовки выполнена в системе Autodesk Autocad.

Обработка фотографии включает следующие операции: перенос фотографии в систему Autodesk Autocad, построение координатных осей на фотографии, получение координат фиксированных точек в масштабе 1:1 для наружной и внутренней поверхностей заготовки [13]. Результаты замеров геометрических параметров заготовки при нагрузке и при расчетах по схеме очага деформации (см. рис. 2), а также координаты характерных точек для расчета радиусов кривизны заготовки при нагрузке представлены в табл. 1.

Для детального анализа формы трубной заготовки в очаге при неконтактном взаимодействии были выбраны шесть характерных точек (рис. 3). Модель обжатия устанавливалась на основе упруго-пластичной деформации [14]. На участке отрыва заготовки от поверхности пуансона (см. рис. 3, дуга 1 – б) по точкам рассчитывались радиусы формовки четырех участков, проходящих по трем соседним точкам заготовки с последующим сдвигом от центра до конечной точ-

ки участка отрыва. Некоторые особенности режима деформации между заготовкой и пуансоном заключаются в том, что заготовка отрывается от пуансона и лишь небольшая ее часть контактирует с пуансоном, в результате чего получается неточная геометрия [15]. Результаты расчетов по участкам представлены в табл. 2.

Как следует из расчетов, внутренняя поверхность заготовки в очаге деформации, отстающая от гибочного вала, имеет сложную кривизну. Эксперименты показали, что радиусы четырех участков поверхности отрыва заготовки увеличиваются от центра заготовки до точки ее контакта с гибочным валком. График изменения величины радиусов поверхности отрыва заготовки от инструмента представлен на рис. 4. Зависимость изменения радиусов кривизны заготовки в очаге деформации

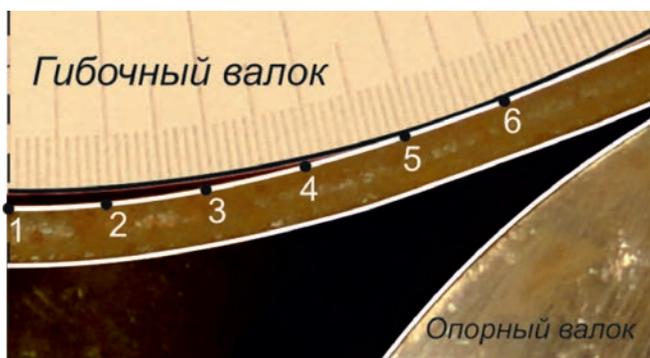


Рис. 3. Правый фрагмент очага деформации при отстаивании заготовки с точками

Fig. 3. Right fragment of deformation zone at lagging of workpiece with dots

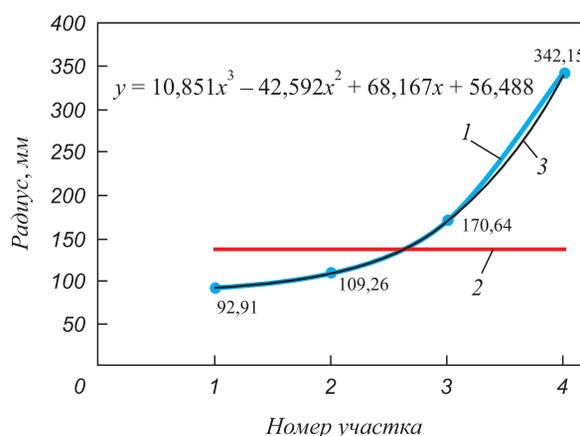


Рис. 4. Изменение радиусов кривизны для четырех размеченных участков поверхности отрыва заготовки:

1 – кривизна отстаивания; 2 – радиус пуансона; 3 – полиномиальная (кривизна отстаивания)

Fig. 4. Changes schedule of the radii of curvature for the four marked portions of the surface of workpiece separation:

1 – curvature of the lagging; 2 – radius of the punch; 3 – polynomial curvature of the lagging

Значения радиусов кривизны экспериментальной поверхности отрыва

Table 2. Values of the curvature radii of the experimental surface of separation

	1	2	3	4	5	6
x	0	5,09	15,06	24,61	37,95	51,95
y	75,10	75,25	76,36	78,31	82,01	86,53
R_{1-2-3}	92,91 участок № 1			–	–	–
R_{2-3-4}	–	109,26 участок № 1		–	–	–
R_{3-4-5}	–	–	170,64 участок № 1		–	–
R_{4-5-6}	–	–	–	342,15 участок № 1		

в зоне отрыва при нагрузке аппроксимирована полиномом третьей степени: $y = 10,85x^3 - 42,59x^2 + 68,16x + 56,48$, где y – величина изгиба профиля заготовки в фиксированных точках; x – текущее значение расстояния фиксированных точек от оси y (табл. 2). Точность аппроксимации кривой на графике (см. рис. 4) лежит в пределах 5 – 10 %.

Выводы. Разработана и освоена методика свободной гибки листовой заготовки применительно к производству сварных прямошовных труб.

На основе экспериментальных значений координат точек внутренней поверхности заготовки при нагрузке в зоне ее отрыва от инструмента рассчитаны радиусы кривизны и подобран полином изменения радиусов по всей поверхности заготовки.

Эксперименты показали, что явление отрыва заготовки оказывает существенное влияние на ее геометрические параметры и должно быть учтено.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самусев С.В., Фадеев В.А. Установки физического моделирования процесса формовки сварных прямошовных труб в лабораторном комплексе кафедры ТОТП НИТУ «МИСИС» // Сб. докл. Междунар. науч.-технич. конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». Ч. 2. – М.: Белый ветер, 2014. С. 136 – 143.
2. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.
3. Самусев С.В., Жигулев Г.П., Фадеев В.А., Файзулаев Ф.Х. Расчет энергосиловых параметров процесса гибки на участке производства сварных труб для магистральных трубопроводов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 7. С. 39 – 42.

4. Мошнин Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.
5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
6. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 287 с.
7. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 119 с.
8. Матвеев Ю.М. Теоретические основы производства сварных труб. – М.: Металлургия, 1967. – 168 с.
9. Рымов В.А., Полухин П.И., Потапов И.Н. Совершенствование производства сварных труб. – М.: Металлургия, 1983. – 312 с.
10. Романцов А.И., Жигунов К.Л., Больдт В.В., Сигида М.С. Разработка технологических режимов участка формовки трубной заготовки в линии ТЭСА 1420 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» // Производство проката. 2011. № 10. С. 20 – 28.
11. Ильюшин А.А. Труды. Т. 2 (1946 – 1966). Пластичность / Составители Е.А. Ильюшина, М.Р. Короткина. – М.: Физматлит, 2004. – 480 с.
12. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов: Учебник для вузов. – 11-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 592 с.
13. Самусев С.В., Люскин А.В., Романцев Б.А. и др. Исследование очага деформации на прессе шаговой формовки в условиях Челябинского трубопрокатного завода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 3. С. 49 – 52.
14. Fan Lifeng, Gao Ying, Li Qiang, Xu Hongshen. Quality control on crimping of large diameter welding pipe // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2012. November. Vol. 25. Issue 6. P. 1264 – 1273.
15. Shiro Kobayashi, Soo-ik Oh, Taylan Altan. Metal forming and the finite-element method. – New York: Oxford University Press, 1989. P. 145 – 151.

Поступила 20 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 3, pp. 154–158.

SIMULATION OF FORMING OF PIPE BILLET AT SPECIALIZED FORMING INSTALLATION

S.V. Samusev, G.P. Zhigulev., V.A. Fadeev, K.S. Manakhov

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

Abstract. A method and results of measuring the billets profile are described for the process of slab molding. The phenomenon of separa-

tion from the workpiece deforming tool in the area of the deformation zone was recorded at the production of longitudinal welded large-diameter pipes. This phenomenon was studied on the separation bending installation. The experiments have shown that the billet in the area of the working gap tool has a complex curvature profile. The authors have worked out a program for calculating the coordinates and radii of curvature of the surface of the workpiece on photographs

of the deformation zone. The curve of the workpiece profile based on the change of curvature of the punch was determined. The phenomenon of billets separation can be used to calculate the radius of curvature after unloading.

Keywords: tubular billet, pipe electric welding, stepping molding, deformation zone, full contact, separation of billets, punch, billet bending.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-154-158

REFERENCES

1. Samusev S.V., Fadeev V.A. Units of physical modeling of the forming process of welded longitudinal pipes in a laboratory complex "MISIS". In: *Sbornik докладov mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa "OMD 2014. Fundamental'nye problemy. Innovatsionnye materialy i tekhnologii"* [Proceedings of the international scientific-technical conference "OMD 2014. Fundamental problems. Innovative materials and technologies"]. Part. 2. Moscow: Belyi veter, 2014. pp. 136–143. (In Russ.).
2. Il'yushin A.A. *Plastichnost'* [Plasticity]. Moscow: Gostekhizdat, 1948, 376 p. (In Russ.).
3. Samusev S.V., Zhigulev G.P., Fadeev V.A., Faizulaev F.Kh. Calculation of energy-power parameters of bending process in production of welded pipes for gas pipelines. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 7, pp. 39–42. (In Russ.).
4. Moshnin E.N. *Gibka i pravka na rotatsionnykh mashinakh* [Bending and straightening on rotary machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 272 p. (In Russ.).
5. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti: uchebnik dlya vuzov* [Applied theory of plasticity and creep: a textbook for universities]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 400 p. (In Russ.).
6. Il'yushin A.A. *Mekhanika sploshnoi sredy* [Continuum Mechanics]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1978, 287 p. (In Russ.).
7. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti: uchebnik dlya vuzov* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 400 p. (In Russ.).
8. Matveev Yu.M. *Teoreticheskie osnovy proizvodstva svarnykh trub* [Theoretical basis of the production of welded pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 168 p. (In Russ.).
9. Rymov V.A., Polukhin P.I., Potapov I.N. *Sovershenstvovanie proizvodstva svarnykh trub* [Improving the production of welded pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 312 p. (In Russ.).
10. Romantsov A.I., Zhigunov K.L., Bol'dt V.V., Sigida M.S. Development of technological modes portion forming billets in TESA 1420 line of OJSC "Chelyabinsk Tube Rolling Plant". *Proizvodstvo prakata*, 2011, no. 10, pp. 20–28. (In Russ.).
11. Il'yushin A.A. *Trudy, T. 2 (1946–1966): Plastichnost'* [Proceedings, vol. 2 (1946–1966), Plasticity]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 480 p. (In Russ.).
12. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov: uchebnik dlya vuzov* [Strength of Materials]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2003, 592 p. (In Russ.).
13. Samusev S.V., Lyuskin A.V., Romantsev B.A., Zhigunov K.L., Fortunatov A.N. Research of the deformation zone on stepwise molding press in conditions of JSC "Cherepovets pipe-rolling plant". *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 3, pp. 49–52. (In Russ.).
14. Fan Lifeng, Gao Ying, Li Qiang, Xu Hongshen. Quality control on crimping of large diameter welding pipe. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, November 2012, vol. 25, Issue 6, pp. 1264–1273.
15. Shiro Kobayashi, Soo-ik Oh, Taylan Altan. *Metal forming and the finite-element method*. New York: Oxford University Press, 1989.

Information about the authors:

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

G.P. Zhigulev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Technology and Equipment for Pipe Production"

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

K.S. Manakhov, MA Student

Received April 20, 2015