

УДК 621.774.621.643

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА. СООБЩЕНИЕ 2

Коликов А.П.¹, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением (apkol@mail.ru)

Звонарев Д.Ю.², к.т.н., заведующий лабораторией

Таупек И.М.³, аспирант

Кадильников С.В.¹, аспирант кафедры обработки металлов давлением

Галимов М.Р.¹, магистр кафедры обработки металлов давлением (galimov-m@mail.ru)

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

² ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности «РосНИТИ»

(454139, Россия, Челябинск, ул. Новороссийская, 30)

³ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС

(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

Аннотация. Представлен анализ качества сварных труб большого диаметра (ТБД) в зависимости от параметров и режимов формовки листовой заготовки на прессовом оборудовании. Выполнено математическое моделирование процессов с применением метода конечных элементов и представлены результаты напряженно-деформированного состояния металла при формовке трубной заготовки в прессовом оборудовании. Созданная программа для ЭВМ позволяет проводить расчет технологических параметров настройки прессового оборудования и определять величины контролируемых геометрических параметров трубной заготовки, предъявляемых в нормативных документах. Теоретические решения проверены экспериментально на сортаменте труб большого диаметра, выпускаемых на ТЭСА 1420. Рекомендовано применять данную методику для расчета параметров формовки ТБД и режимов настройки прессового оборудования, обеспечивающих уменьшение количества дефектов, вызванных геометрией прессового инструмента кромкогибочного прессы и прессы шаговой формовки.

Ключевые слова: сварные трубы большого диаметра, формовка кромки, листовая трубная заготовка, кромкогибочный пресс, пресс шаговой формовки, глубина опускания пуансона, калибровка прессового инструмента.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-615-621

Как было показано авторами в работе [1], одним из путей повышения качества сварных труб большого диаметра (до 1420 мм) – снижение геометрических дефектов, является совершенствование и оптимизация параметров формовки трубной заготовки на прессовом оборудовании: кромкогибочном и прессы шаговой формовки (ПШФ) с применением математического моделирования, основанного на методе конечных элементов [2–4] с использованием различных прикладных программ.

После формовки на кромкогибочном прессы лист перемещается к трубоформовочному прессы шаговой формовки, в котором производится гибка листа по всей длине с помощью штампа, размеры которого выбираются в соответствии с размерами готовой трубы. Так, например, при производстве труб диаметром 1420 мм формовка листа с одной стороны производится за 10 шагов и получается сечение J-образной формы (рис. 1, а). Затем лист перемещается на другую

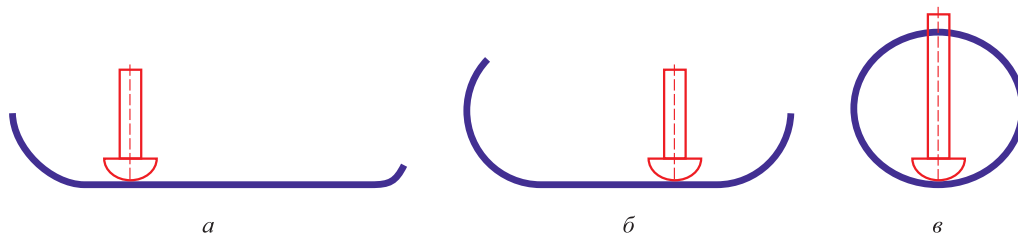


Рис. 1. Последовательность операций формовки листовой заготовки в прессы шаговой формовки: а – формовка левой части заготовки; б – формовка правой части заготовки; в – формовка средней части заготовки

Fig.1. Sequence of the sheet blank processing in the press of stepwise forming: а – forming of the left part of the blank; б – forming of the right part of the blank; в – forming of the middle part of the blank

сторону и второй манипулятор устанавливает его для гибки другой стороны (рис. 1, б), после которой также за 10 шагов листовая заготовка получает С-образный профиль. На последней стадии – на 21-ом шаге (рис. 1, в) формируется О-образный профиль трубы с открытым швом, после чего труба поступает в сборочно-сварочный стан.

Авторами разработана математическая модель (с применением метода конечных элементов [5]) и алгоритм расчета усилия гибки, а также глубины опускания пуансона H , по величине которого проверяются геометрические параметры фактического радиуса, высоты H_{ϕ} и ширины B_{ϕ} формируемого участка последовательно на каждом i -ом шаге всей длины заготовки после распушивания в зависимости от механических свойств заготовки, профиля гибочных матриц и настроечных параметров прессы.

На первом этапе для численного моделирования выбран программный продукт MSC Marc [6] и полный факторный эксперимент (ПФЭ) со схемой 34. В ПФЭ были выбраны следующие факторы:

Параметр	Пределы изменения
Толщина листа	От 8 до 48 мм с интервалом 20 мм
Величина предела текучести σ_T	K52 ($\sigma_T = 450$ МПа)
Радиус пуансона $R_{\text{пуансон}}$	180, 350, 450 мм
Ширина пуансона $B_{\text{пуансон}}$	$B_{\text{пуансон}} = \psi(R_{\text{пуансон}})$
Расстояние между опорами нижнего инструмента A	200, 350, 450 мм
Радиус заготовки на предыдущем шаге R_{i-1}	200, 435, 670 мм

Количество численных экспериментов по предложенной схеме ПФЭ 3^4 составляет 81 шт.

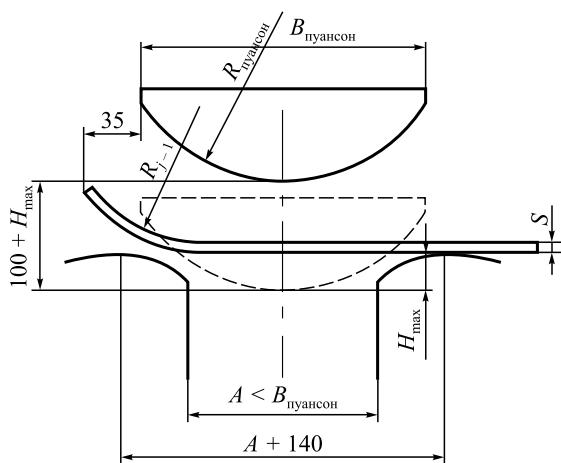


Рис. 2. Схема к расчету параметров шаговой формовки листовой заготовки методом конечных элементов

Fig. 2. Calculation scheme of the stepwise forming parameters of the sheet blank by finite element method

Известно, что при формовке заготовок на прессе шаговой формовки между предыдущим и последующим участками может быть прямолинейный участок L (см. рис. 1), по причине которого возможно появление геометрических дефектов.

При анализе статистических данных по геометрическим дефектам наиболее проблемным сортаментом $D_T \times S_T$ является производство труб диаметром $D_T = 530, 559, 720, 820$ и 1220 мм с толщиной стенки до $18 - 20$ мм. Так, например, при формовке листовой заготовки на прессе шаговой формовки в интервале толщин стенок $S_T = 8 - 18$ мм отмечен самый большой прямолинейный участок между местоположением первого шага и шириной подогнутой кромки листа и процент возврата труб на повторное экспандирование составляет более 10 %.

Как следует из рис. 3, величина прямолинейного участка при формовке листовой заготовки на i -ом шаге рассчитывается по уравнению

$$L = l_{H_{\text{шаг}}} - \widehat{l}_{0i} - \widehat{l}_{i-1}, \quad (2)$$

в котором составляющие определяются по следующим зависимостям:

$$l_{H_{\text{шаг}}} = \left(1 + \frac{\pi S}{\Pi}\right) l_{\text{шаг}}; \quad (3)$$

$$\widehat{l}_{0i} = (R_i + S) 2 \arcsin \left[\frac{R_i + S}{\sqrt{(x'_{3i} - x'_{7i})^2 + (y'_{3i} - y'_{7i})^2}} \right]; \quad (4)$$

$$\widehat{l}_{i-1} = (R_{i-1} + S) 2 \arcsin \times \left[\frac{R_{i-1} + S}{\sqrt{(x'_{5i-1} - x'_{7i-1})^2 + (y'_{5i-1} - y'_{7i-1})^2}} \right]. \quad (5)$$

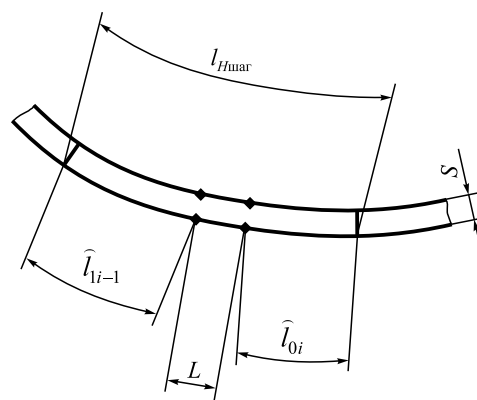


Рис. 3. Схема к расчету прямолинейного участка при шаговой формовке:

$l_{H_{\text{шаг}}}$ – общая длина шага по наружной поверхности; \widehat{l}_{0i} – длина дуги от горизонтальной проекции \widehat{l}_{i-1} на предыдущем шаге формовки листа

Fig. 3. Calculation scheme of the straight section at stepwise forming: $l_{H_{\text{шаг}}}$ – the total length of the pitch on the outer surface; \widehat{l}_{0i} – length of the arc from the horizontal projection \widehat{l}_{i-1} of the previous step of sheet forming

Расчетные данные по сумме горизонтальных проекций при различных расстояниях между нижними бойками

Table 1. Estimated data on the sum of the horizontal projections at various distances between the lower backups

A , мм	$\Sigma l = l_0 - l_1$, мм	A , мм	$\Sigma l = l_0 - l_1$, мм	A , мм	$\Sigma l = l_0 - l_1$, мм
200	86,068	280	157,115	340	214,025
230	112,028	290	166,37	350	223,763
240	120,813	300	175,764	370	243,393
250	129,784	310	185,231	380	253,317
260	138,814	320	194,721	390	263,274
270	147,909	330	204,313	400	273,259

Представленная система уравнений (3) – (5) решается с помощью алгоритма [7].

Для определения горизонтальных проекций l_0 и l_1 рассмотрены следующие этапы процесса гибки листовой заготовки на i -ом шаге формовки листа: стадия минимальной глубины опускания пуансона; стадия средней глубины опускания пуансона; стадия максимально возможной глубины опускания пуансона. Для каждого из этапов разработаны расчетные схемы и определены аппроксимирующие уравнения для определения горизонтальных проекций l_0 , l_1 формуемых участков в зависимости от расстояния между бойками A (табл. 1), а также глубины опускания пуансона H (см. рис. 2), вычисление которых производится по соответствующим алгоритмам [7].

Определены условия образования прямолинейных участков между формуемыми радиусами заготовки.

Данная модель позволяет также рассчитывать радиус пуансона, при котором обеспечивается отсутствие прямолинейного участка между формуемыми шагами листовой заготовки (табл. 2).

Для производства труб типоразмера $D_T \times S_T = 720 \times 22$ мм категории прочности К52 – К65 по результатам проведенных расчетов рекомендуется устанавливать расстояние между опорами нижних бойков $A = 250$ мм и радиус пуансона $R_{\text{пуансон}} = 240$ мм.

Таблица 2

Расчетный радиус пуансона в зависимости от механических свойств для труб размером $D_T \times S_T = 720 \times 22$ мм

Table 2. Estimated punch radius depending on the mechanical properties for the pipe with the size $D_T \times S_T = 720 \times 22$ mm

Класс прочности	$R_{\text{пуансон}}$, мм	Класс прочности	$R_{\text{пуансон}}$, мм
К34	260	К60	240
К52	240	К65	240
К56	240	К80	225

На практике настройку инструмента прессы шаговой формовки проводят по величине глубины опускания пуансона H .

Для оценки достоверности полученных регрессивных уравнений расчета глубины опускания пуансона H по шагам формуемых листовых заготовок проведен комплекс экспериментальных исследований по замеру фактической глубины опускания пуансона.

В табл. 3 приведены результаты замера глубины опускания пуансона H_i ($i = 1 \dots 8$ – шаги пуансона при формовании левой половины и $i = 9 \dots 16$ – правой стороны заготовки, $i = 17$ – последний шаг формования заготовки в круг) для этого же типоразмера трубы на прессы шаговой формовки (радиус пуансона 280 мм, ширина пуансона 350 мм, расстояние между бойками 290 мм).

Сравнение результатов расчета по разработанной модели и экспериментальных значений глубины опускания пуансона H при формовке листовой заготовки на ПШФ для труб различного типоразмера и категории прочности показало хорошую сходимость.

Как отмечено в ряде работ [1, 4, 8 – 10], на качество сборки и сварки труб большого диаметра при прокладке магистральных трубопроводов влияет напряженно-деформированное состояние металла как по всему сечению трубы, так и на торцах заготовки, что вызывает появление остаточных напряжений [11, 12] в поперечных сварных швах, которые снижают прочность трубопровода при эксплуатации.

В связи с этим на втором этапе исследований проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния металла при шаговой формовке листовой заготовки в программном комплексе DEFORM-3D. Для более детального рассмотрения распределения деформаций по ширине заготовки была нанесена 21 контрольная точка, в которых отслеживалось изменение рассматриваемых параметров. Наносились две серии точек: первая располагалась на расстоянии 2 мм от внешней поверхности листа, а вторая находилась в середине толщины листа на расстоянии 11 мм от поверхности (рис. 5).

Расчетные $H_{расч}$ и экспериментальные $H_{эксп}$ значения глубины опускания пуансона при формовке листовой заготовки для получения труб типоразмера $D_T \times S_T = 720 \times 22$ мм категории прочности X45SS (аналог стали K52) (радиус пуансона $R_p = 280$ мм, ширина пуансона $B = 350$ мм, расстояние между бойками $A = 290$ мм)

Table 3. Calculated ($H_{расч}$) and experimental ($H_{эксп}$) values of the depth of the punch lowering when forming the sheet blank for pipe with the size $D_T \times S_T = 720 \times 22$ mm of KH45SS strength grade (analogue of K52 steel) (punch radius is $R_p = 280$ mm; width of the punch is $B = 350$ mm; the distance between the backups is $A = 290$ mm)

Номер трубы	Шаг формовки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	17	
	Расчетная величина глубины опускания пуансона $H_{расч}$, мм									
	28	26	26	25	25	25	24	24	24	24
Экспериментальная величина глубины опускания пуансона по шагам $H_{эксп}$, мм										
1	29	28	25	24	23	24	25	23	25	25
2	29	28	24	23	23	24	24	25	26	26
3	29	28	24	23	23	23	25	26	27	27
4	29	28	24	23	23	24	25	25	27	27
5	29	28	24	23	23	24	26	26	27	27

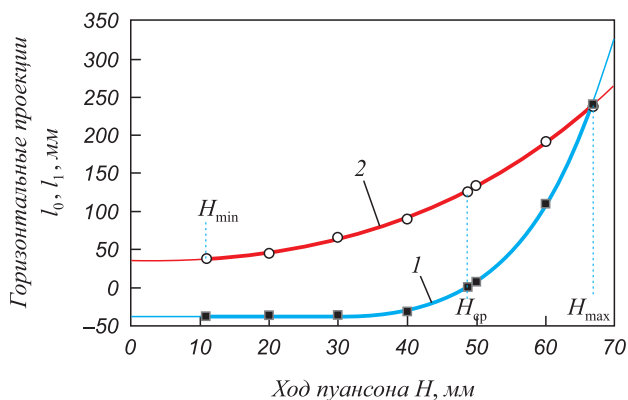


Рис. 4. Характер изменения горизонтальных проекций l_0 (1) и l_1 (2) при различной глубине опускания пуансона

Fig. 4. Nature of the changes of horizontal projections l_0 (1) and l_1 (2) at different depths of the punch lowering

На рис. 6 представлены схема сборки и элементы конечно-элементной сетки.

На рис. 7 и в табл. 5 приведены результаты расчета накопленной степени деформации при формовке трубы типоразмера $D_T \times S_T = 720 \times 22$ мм из стали AISI-1070 (аналог K52), модуль Юнга $E = 206\,754$ МПа.

Результаты исследования указывают на неравномерность распределения напряженно-деформированного металла в различных сечениях O-образного профиля (на первом, втором, третьем и десятом шагах) на прессе шаговой формовки по всей длине заготовки. Это указывает на то, что в этих сечениях происходит прогиб листовой заготовки (величина деформации минимальна $\epsilon_{min} = 0,10 - 0,03$). При последующей доформовке O-образной заготовки на сборочно-сварочном стане в этих местах не происходит плотного прилегания ее

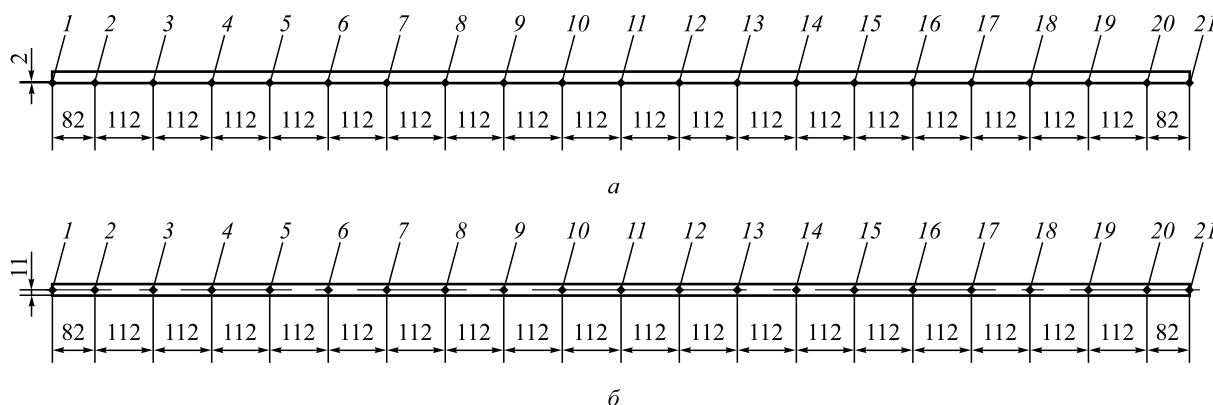


Рис. 5. Схема расположения точек у внешней поверхности (а) и в середине листа (б)

Figure 5. The circuit arrangement of points on the outer surface (a) and in the middle of the sheet (b)

Расчетные и экспериментальные данные (по величине хода пуансона на прессе шаговой формовки для трубы $D_T \times S_T = 1420 \times 32$ мм класса прочности К60 ($R_n = 500$ мм, $B = 600$ мм, $A = 450$ мм))

Table 4. Calculated and experimental data (in size of the punch stroke at press of stepwise forming for the pipe $D_T \times S_T = 1420 \times 32$ mm of K60 strength grade ($R_n = 500$ mm; $B = 600$ mm; $A = 450$ mm))

Шаг формовки										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	21
Расчетная глубина опускания пуансона $H_{расч}$, мм										
25	23	22	22	22	23	23	22	22	22	22
Экспериментальная глубина опускания пуансона по шагам $H_{эсп}$, мм										
24	23	23	22	22	22	22	23	23	22	25

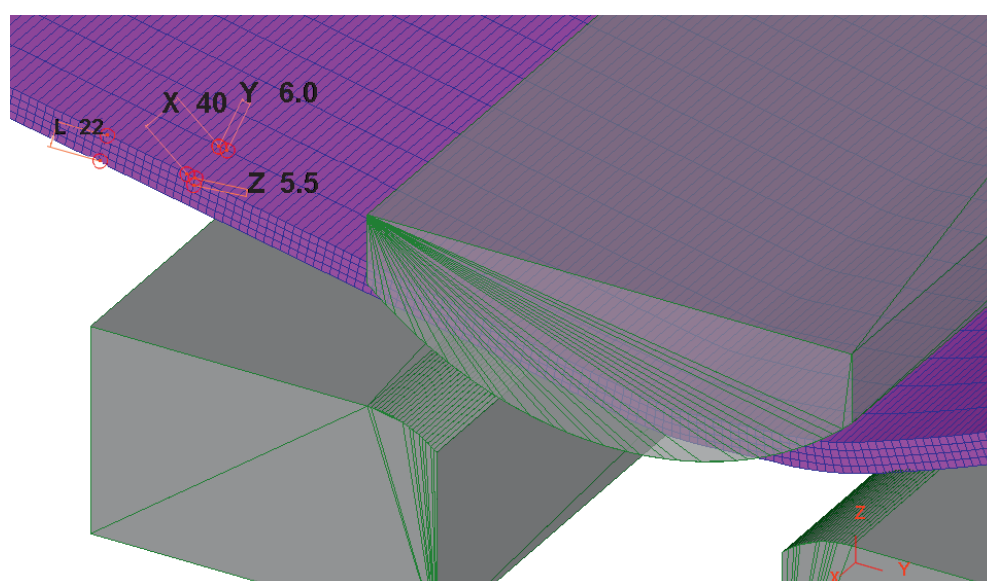


Рис. 6. Схема сборки и элементы конечно-элементной сетки

Fig. 6. Assembly diagram and elements of finite element mesh

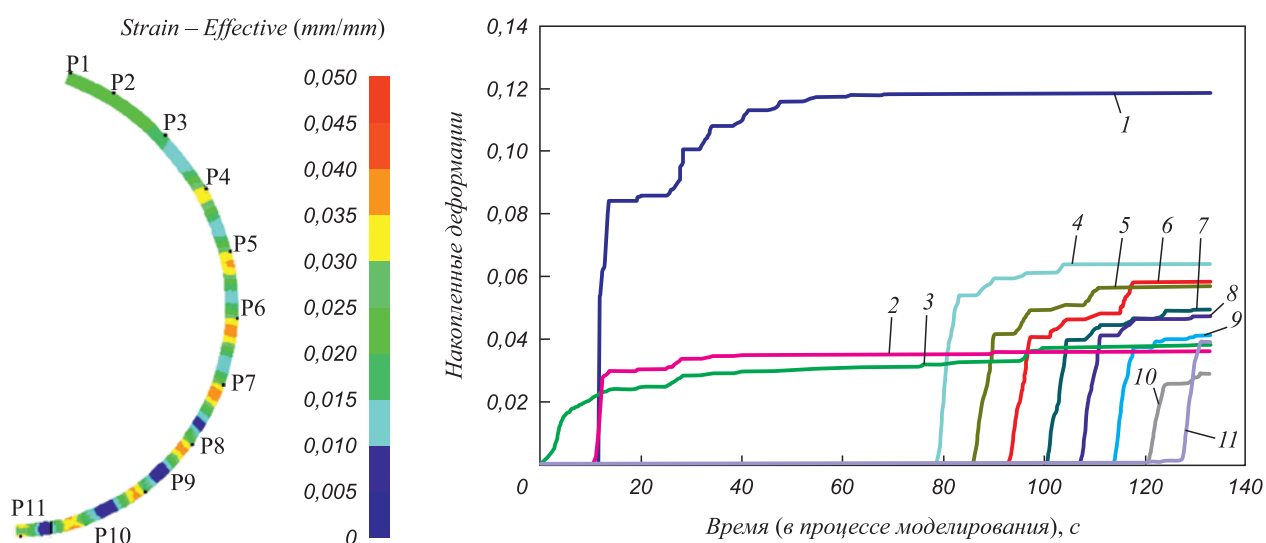


Рис. 7. Распределение накопленных деформаций после пошаговой формовки в контрольных точках

Fig. 7. Distribution of accumulated strain after stepwise forming at the control points

Величина накопленных деформаций после пошаговой формовки в контрольных точках на внешней поверхности и в середине листа

Table 5. The value of the accumulated deformation after the stepwise forming at the control points on the outer surface and in the middle of the sheet

Накопленные деформации							
на внешней поверхности листа				в середине листа			
Номер точки	ε_{1-10}	Номер точки	ε_{11-21}	Номер точки	ε_{1-10}	Номер точки	ε_{11-21}
1	0,118593	11	0,039165	1	0,107412	11	0,034524
2	0,036172	12		2	0,024706	12	0,041967
3	0,038279	13	0,122389	3	0,025658	13	0,084071
4	0,064039	14	0,057021	4	0,043939	14	0,039443
5	0,057008	15	0,065698	5	0,038144	15	0,050499
6	0,058388	16	0,079231	6	0,03976	16	0,049593
7	0,049556	17	0,057106	7	0,03443	17	0,047837
8	0,047370	18	0,090171	8	0,033748	18	0,055981
9	0,041333	19	0,052796	9	0,033356	19	0,040406
10	0,029101	20	0,038491	10	0,021506	20	0,026373
		21	0,119802			21	0,074993

краевых участков, что приводит к некачественной сварке технологического шва. Для создания более равномерного распределения деформаций металла по всему сечению O-образного профиля необходимо формовку металла на таких участках проводить с повышенным давлением в гидроцилиндрах пресса.

Выводы. На основе разработанного комплекса математических моделей расчета настроечных параметров пресса шаговой формовки была произведена формализация алгоритмов расчета технологических режимов формовки трубной заготовки и режимов настройки оборудования, создана автоматизированная система расчета, архивирования данных для изготовления труб различного диаметра, толщины стенки и марок сталей [3].

Программный продукт для ЭВМ «ZV_JCO» ZV JCO [13] позволяет в диалоговом режиме выполнять многовариантные расчеты режимов формуемой листовой заготовки и параметров настройки пресса шаговой формовки, а также определять значения контролируемых параметров для требуемых размеров заготовки. Данный комплекс позволил сократить в несколько раз время на составление технологических карт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zvonarev D.Yu., Osadchii V.Ya., Romantsov A.I., Kolikov A.P. Shaping of Sheet to Produce Large-Diameter Welded Pipe // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 6. P. 443 – 446.
- Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. / Под ред. В.Е. Селезнева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с.
- Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. / В.Н. Данченко, А.А. Миленни, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.
- Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology // Metallurgist. 2012. Vol. 55. No. 11 – 12. P. 833 – 840.
- Звонарев Д.Ю., Осадчий В.Я., Романцов А.Н., Коликов А.П. Разработка математической модели формовки листовой заготовки для повышения качества сварных труб большого диаметра // Черные металлы. 2015. № 4. С. 34 – 39.
- License for MSC Agreement: RE006574CTR. Customer: Chelyabinsk Tube Rolling Plant.
- Звонарев Д.Ю. Совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм: Дисс. ... канд. техн. наук. – Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), 2015.
- Kishiguchi T., Hosoda H., Ikunoetal Y. etc. Pipe end round equipment and control system (PER-FECTS) // Chin-Niittetsu-Sumikin Engineering Gino. 2013. Vol. 4. P. 39 – 45.
- Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М и др. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. № 7. С. 449 – 455.
- Lifeng F., Ying G., Qiang L., Xu H. Quality control on crimping of large diameter welding pipe // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2012. Vol. 25. No. 6. P. 1264 – 1274.
- Хажинский Г.М. Механика мелких трещин и надежность элементов трубопроводов. – М.: ИНЭК, 2007. – 295 с.
- Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D.B. etc. Residual Stress in Welded Pipe // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 11. P. 808 – 812.
- ZVJCO: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660023 / Д.Ю. Звонарев; заявл. 27.08.2013; опубли. 20.12.2013.

Поступила 6 апреля 2016 г.

MATHEMATICAL MODEL OF PLASTIC FORMING OF THE SLAB FOR LARGE DIAMETER WELDED PIPES. REPORT 2

*A.P. Kolikov*¹, *D.Yu. Zvonarev*², *I.M. Taupek*³, *S.V. Kadil'nikov*¹, *M.R. Galimov*¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

² Russian Scientific Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk, Russia

³ Sary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISIS”, Sary Oskol, Russia

Abstract. The analysis of quality of large diameter welded pipes depending on the parameters and modes of the slab forming on press equipment is presented. Mathematical modeling of the processes was performed using the finite element method. The results of the stress-strained state of metal during round billet forming billets in forging equipment are shown. Established computer program allows calculating of process parameters settings of press equipment to determine the value of controlled geometric parameters of round billets, required in the regulations. The theoretical solutions were experimentally tested on assortment of large diameter pipes, produced at TESA 1420. It is recommended to use this method to calculate the LDP forming parameters and pressing equipment settings that allows reducing the number of defects caused by the geometry of the flanging press and JCO-press.

Keywords: large diameter welding pipe, forming, edge, round billet, flanging press, JCO-press, depth of punch lowering, calibration of press instrument.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-615-621

REFERENCES

1. Zvonarev D.Yu., Osadchii V.Ya., Romantsov A.I., Kolikov A.P., Shaping of Sheet to Produce Large-Diameter Welded Pipe // *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 6, pp. 443–446.
2. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Pryalov S.N. *Osnovy chislennogo modelirovaniya magistral'nykh truboprovodov* [Basics of numerical modeling of pipelines]. Seleznev V.E. ed. Moscow: MAKSS Press, 2009, 436 p. (In Russ.).
3. Danchenko V.N., Milenin A.A., Kuz'menko V.I., Grinkevich V.A. *Komp'yuternoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem. Chislennyye metody* [Computer simulation of processes of metal forming. Numerical methods]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2005, 448 p. (In Russ.).
4. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology // *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 11–12, pp. 833–840.
5. Zvonarev D.Yu., Osadchii V.Ya., Romantsov A.N., Kolikov A.P. Development of mathematical model of forming of a sheet material to improve the quality of welded pipes of large diameter. *Chernaya metallurgy*. 2015, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.).
6. *License for MSC Agreement: RE006574CTR*. Customer: Chelyabinsk Tube Rolling Plant.
7. Zvonarev D.Yu. *Sovershenstvovanie protsessov podgibki kromok i shagovoi formovki svarnykh trub bol'shogo diametra dlya obespecheniya vysokoi tochnosti razmerov i form. Dis...kand. tekhn. nauk*. [Process improvement of pre-banding and step molding of welded pipes of large diameter to ensure high accuracy of dimensions and shapes. Cand. Tech. Sci. Diss.]. Chelyabinsk: YuUrGU (NIU). 2015. (In Russ.).
8. Kishiguchi T., Hosoda H., Ikuno Y. etc. Pipe end round equipment and control system (PER-FECTS). *Chin-Niittetsu-Sumikin Engineering Gino*. 2013, vol. 4, pp. 39–45.
9. Kolikov A.P., Zvonarev D.Yu., Taupek I.M., Kadil'nikov S.V., Galimov M.R. Mathematical model of plastic forming of the slab for large diameter welded pipes. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 7, pp. 449–455. (In Russ.).
10. Lifeng F., Ying G., Qiang L., Xu H. Quality control on crimping of large diameter welding pipe. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012, vol. 25, no. 6, pp. 1264–1274.
11. Khazhinskii G.M. *Mekhanika melkikh treshchin i nadezhnost' elementov truboprovodov* [Mechanics of small cracks and reliability of pipeline components]. Moscow: INEK, 2007, 295 p. (In Russ.).
12. Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D.B., Kulyutin S.A., Kadil'nikov S.V. Residual Stress in Welded Pipe. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 11, pp. 808–812.
13. Zvonarev D.Yu. *ZV JCO*. Certificate of state registration of computer program no. 2013660023, publ. 20.12.2013. (In Russ.).

Information about the authors:

A.P. Kolikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (apkol@mail.ru)

D.Yu. Zvonarev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory

I.M. Taupek, Postgraduate

S.V. Kadil'nikov, Postgraduate of the Chair “Metal Forming”

M.R. Galimov, MA Student of the Chair “Metal Forming” (galimov-m@mail.ru)

Received April 6, 2016