

УДК 621.774: 621.643

Шинкин В. Н.  
Коликов А. П.**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ  
ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

Магистральный трубопроводный транспорт России, протяженность которого в 2005 г. превышала 221 тыс. км и по которому перемещалось 100 % добываемого газа, 80 % добываемой нефти и более 20 % продукции нефтепереработки, является важнейшей составляющей отечественного топливно-энергетического комплекса [1].

Специфика отечественных магистральных трубопроводов состояла в использовании труб большого диаметра: прямошовных (одно- и двухшовных) диаметром до 1220 мм и толщиной стенки до 14,5 мм и спиральношовных диаметром до 1420 мм, толщиной стенки до 15,7 мм и длиной от 6,0 до 12,5 м класса прочности до X60 по стандарту API [2]. Для производства сварных труб данного сортамента использовались следующие схемы формовки листовой заготовки в цилиндрическую: формовка в четырехвалковых вальцах (Новомосковский трубный завод), непрерывных валковых станах (Харцизский трубный завод), формовка на прессах (Челябинский трубопрокатный и Выксунский металлургический заводы) и спиральная (Волжский трубный завод) [3].

Основной сортament, принятый в России «Газпромом» и «Транснефтью» в последнем десятилетии в качестве базового для строительства современных магистральных газопроводов Северный и Южный потоки, Ямал – Центр, Сахалин – 1, Сахалин – 2 и нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан», предусматривает применение труб из стали класса прочности X70, X80 и даже X100 с диаметром 1420 и 1220 мм, толщиной стенки до 48 мм, длиной до 18,5 м, рабочим давлением до 250 атм. (24,7МПа), трехслойным наружным изоляционным антикоррозионным покрытием и внутренним гладкостным покрытием для прокладки сухопутных и подводных морских участков трубопроводов [4].

Для обеспечения высоких требований к трубам при эксплуатации перспективных магистральных трубопроводов на рынке производства сварных труб большого диаметра в условиях конкуренции с прессовой (схема UOE) и валковой формовкой в отечественной и зарубежной практике трубного производства утвердился процесс формовки по схеме JUOE, разработанный фирмой «SMS Meer» (рис. 1) [5].

Основными производителями прямошовных одношовных труб для магистральных газопроводов диаметром  $\geq 1220$  мм за рубежом являются фирмы «Manesmann Demag Meer» (Германия), «Ytalsider» (Италия) и «Син ниппон сэйтэцу» (Япония). В России производство таких труб осуществляется на Выксунском (ВМЗ), Ижорском (ИжТЗ), Волжском (ВТЗ) и Челябинском (ЧТПЗ) заводах (табл. 1). Созданные в России мощности по производству труб большого диаметра в объеме до 5 млн т в год обеспечивают потребности в трубах нефтегазового комплекса до 2020 г. [6].

Целью работы является моделирование технологических параметров гибки листа для производства труб большого диаметра.

Для производства труб диаметром до 1420 мм с толщиной стенки до 48 мм и длиной до 18,5 м применяется пошаговая формовка листовой заготовки на прессах (схема JUOE), при которой на первой стадии подгибка обоих кромок листа производится одновременно с двух сторон пунсоном длиной до  $\sim 3$  м, после чего заготовка по рольгангу перемещается в продольном направлении на величину  $\sim 3$  м и операция повторяется до конечной длины заготовки (рис. 1). На второй стадии процесса формовка заготовки осуществляется по всей длине листа вначале с одной стороны до центра, а затем подгибка осуществляется с другой стороны до центра с определенной подачей под штамп (рис. 1).

Таблица 1

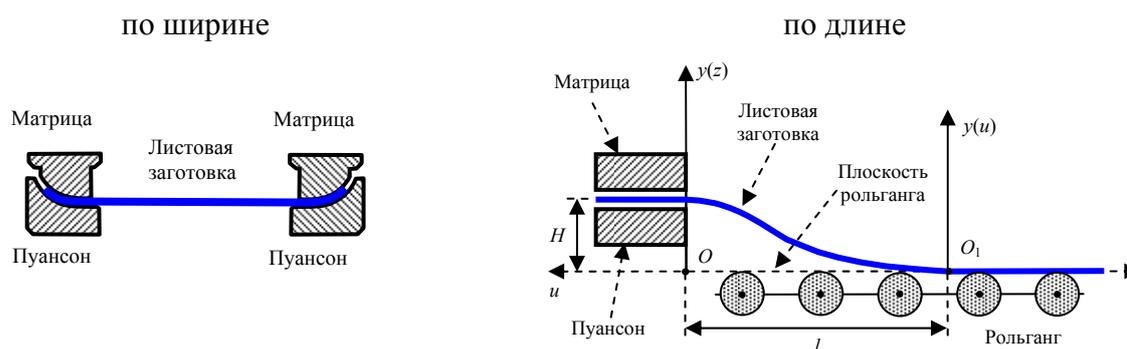
Сравнительные характеристики сварных (одношовных) труб большого диаметра с пошаговой формовкой на гидравлических прессах

Характеристики	Производители					
	Зарубежные		Отечественные			
	Европа	Япония	ОАО «ВМЗ»	ОАО «ИжТЗ»	ОАО «ВТЗ <sup>*2)</sup> »	ОАО «ЧТПЗ <sup>*1)</sup> »
Диаметр, мм	530–1420	406–1420	530–1420	530–1420	530–1420	508–1420
Толщина стенки, мм	7,0–40	6,0–44,5	7,0–48	7,0–40	7–42	7,0–48
Длина, м	10,5–11,6; 18,0	10,5–11,6; 18,0	10,5–11,6	До 18	До 12,5	До 18,3
Класс прочности	X60–X100	X60–X100	X60–X100	X60–X100	До 80	До 100

\*1) ТЭСА 1420 введен в эксплуатацию в июле 2010 г.

\*2) на ВТЗ работает ТЭСА с валковой формовкой листовой заготовки.

### Гибка кромок листовой заготовки – стадия 1



### Пошаговая формовка листовой заготовки по всей ее длине

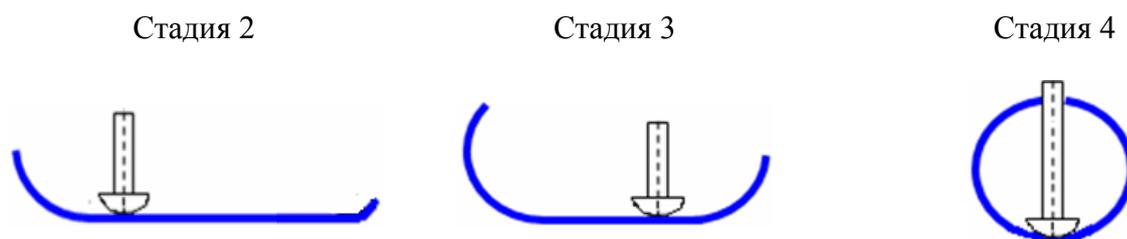


Рис. 1. Последовательность операций при пошаговой формовке трубной заготовки по схеме ЮОЕ

Авторами разработана математическая модель процесса пластического формоизменения листовой заготовки в трубу по схеме ЮОЕ, которая позволяет определить геометрические размеры прессового инструмента и формируемого трубного профиля, обеспечивающих остаточную кривизну поверхности заготовки, максимально приближенную к требуемому профилю сформованной трубы, а также необходимое для этого усилие деформирования в зависимости от сортамента и механических свойств трубы [7].

Поскольку процесс пластического формоизменения кромок листовой заготовки происходит без предварительного ее нагрева в области упругопластической деформации [8], то после

снятия нагрузки (давления пуансона и роликов) в трубной заготовке основные напряжения переходят в остаточные, в результате действия которых в сформованной кромке листовой заготовки происходит распруживание.

В рассматриваемой модели под действием усилия пуансона  $P_{ш.ф}$  процесс пошаговой формовки листовой заготовки рассматривается по стадиям (рис. 1) и принята упругопластическая модель среды [8].

Подгибка кромок листовой заготовки в поперечном сечении происходит одновременно и симметрично относительно центральной продольной оси листа; профиль контактной поверхности пуансона и матрицы задается в виде части эвольвенты. При заданной ширине заготовки и расстоянии между пуансонами авторами расчетным путем получены координаты  $x$ ,  $y$  и радиуса кривизны  $\rho$  профиля поверхности пуансона и матрицы, а также размеры заготовки после ее распруживания, кривизна которой максимально приближена к профилю формуемой трубы (табл. 2).

Таблица 2

Численные расчеты размеров гибки кромки листовой заготовки для диаметра трубы  $D_T = 1420$  мм:

а – параметры гибки кромки листовой заготовки (параметры эвольвенты  $r = 435,7$  мм,  $\varphi_0 = 88^\circ$ ,  $\varphi_k = 43^\circ$ )

$x$ , мм	0	50	100	150	200	250	300	350	358,84
$y$ , мм	0	1,90	7,78	18,00	33,12	54,05	82,37	121,37	129,89
$\rho$ , мм	669,2	635,8	600,3	562,0	519,9	472,3	415,9	343,0	327,0

б – высота подгибки кромки заготовки  $H_1$  после распруживания кромки листа

Толщина листа, мм	$\sigma_T$ , Н/м <sup>2</sup>	Длина подгибаемой кромки листа, мм	Величина $H_1$ , мм		Отклонение расчетного $H_1$ от нормативного значения, %
			Нормативная	Расчетная	
30	650	422	$86 \pm 5$	87,9	2,2 %
26	650	430	$86 \pm 5$	87,4	1,6 %
22	650	442	$86 \pm 5$	86,7	0,8 %
19	650	450	$86 \pm 5$	84,0	2,3 %

Результаты приведенных данных показывают удовлетворительную сходимость нормативных (технологических) и расчетных значений параметров заготовки после ее распруживания для широкого диапазона типоразмеров и материала заготовки.

Вторая стадия подгибки кромок по всей длине листовой заготовки (рис. 1) на кромкогибочном прессе осуществляется пошаговым способом до конечной длины заготовки  $L_3$ , равной 10,5–18,5 м. При длине листа 18,5 м подгибка кромок производится за 8 циклов. При этом из-за разности высот листа в точках его контакта с пуансоном-матрицей и рольгангом возникают остаточные напряжения, которые могут вызвать появление дефекта в виде «гофра» на участке перехода между шагами. В предлагаемой модели определена форма листовой заготовки в продольном направлении в момент ее формовки на кромкогибочном прессе. С использованием численной многорадиусной схемы расчета авторами определена величина продольного перепада высот листовой заготовки  $H_{критич}$ , при которой происходит возникновение гофра в процессе пластического формоизменения листовой заготовки с различным пределом текучести  $\sigma_T$  ( $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\gamma = 78,5$  кН/м<sup>3</sup>) (рис. 2).

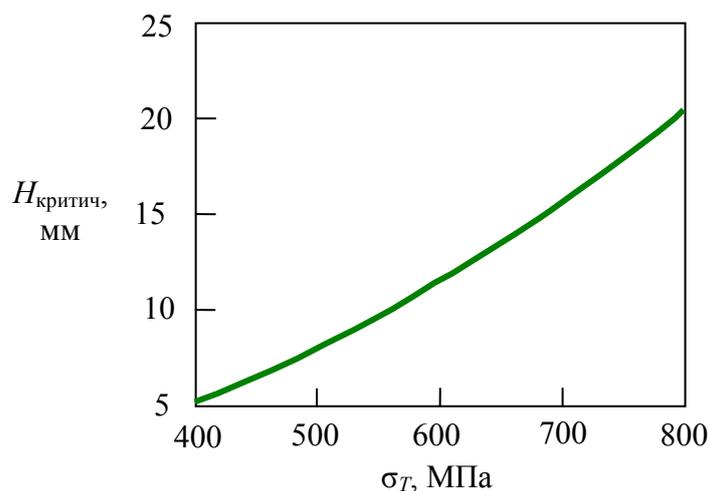


Рис. 2. Зависимость критического значения перепада высот листа  $H_{\text{критич}}$  от предела текучести стали  $\sigma_T$

Ниже приведены формулы по определению основных параметров процесса пошаговой формовки листовой заготовки по всей ее длине.

На 2-ой и 3-ей стадиях процесса (рис. 3):

– усилие пуансона, кН:

$$P_{\text{шф}} = \frac{M \cos \alpha (\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{\frac{L}{2} + r_M - (r_{\text{II}} + r_M) \sin \alpha} + \frac{M (\cos \alpha_1 + \mu \sin \alpha_1)}{2 \beta r_{\text{II}} \sin\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right) \left(\cos\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right) + \mu \sin\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right)\right)};$$

– число шагов пуансона:

$$N_{\text{шагов}} = \frac{2 \pi \beta r_{\text{II}} - (LL - A) - z - 2 r_{\text{II}} \varphi_1}{r_{\text{II}} (\alpha + \varphi_1)} + 1;$$

– максимальная глубина прогиба листа, мм:

$$H_{\text{max}} = r_{\text{II}} + r_M - \sqrt{(r_{\text{II}} + r_M)^2 - \left(\frac{L}{2} + r_M\right)^2}, \quad L \leq 2r_{\text{II}}.$$

На 3-ей стадии окончательного формообразования заготовки (рис. 4):

– усилие пуансона, кН:

$$P_{\text{шф}} = \frac{M (\cos \alpha_1 + \mu \sin \alpha_1)}{\beta_1 r_{\text{II}} \sin\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right) \left(\cos\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right) + \mu \sin\left(\frac{\alpha_1 - \varphi_1}{2}\right)\right)};$$

– максимальная глубина прогиба предварительно сформованной заготовки определяется по формуле, приведенной выше.

В приведенных выше формулах величина изгибающего момента  $M$  при нагрузке в рассматриваемом сечении равна:

$$M = \frac{1}{4} b h^2 \sigma_T - \frac{1}{3} b \rho^2 \frac{\sigma_T^3}{E^2} + \frac{b \Pi}{6} \left( \frac{h}{2\rho} - \frac{\sigma_T}{E} \right) \left( h^2 - h \rho \frac{\sigma_T}{E} - 2\rho^2 \frac{\sigma_T^2}{E^2} \right).$$

Остальные величины показаны на рис. 3–4.

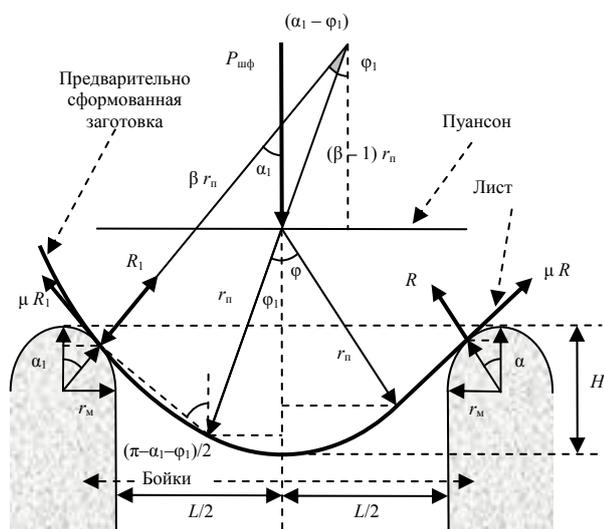


Рис. 3. Схема гибки трубной заготовки, левая часть которой является сформованной цилиндрической, а правая – недеформированной плоской

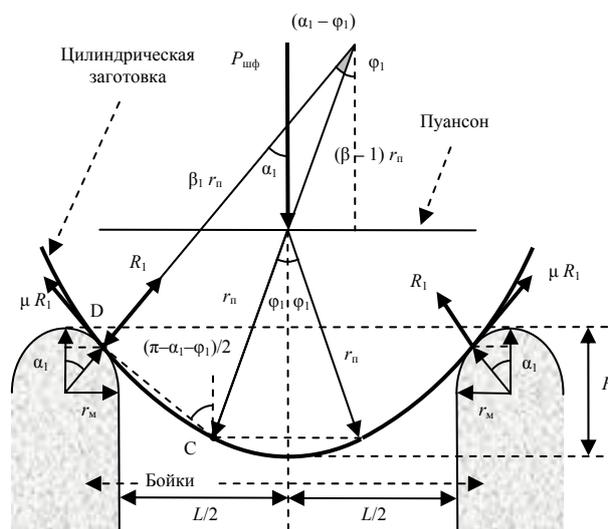


Рис. 4. Схема гибки предварительно сформованной листовой трубной заготовки на прессе пошаговой формовки

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологических режимов и успешного освоения технологии производства стальных труб большого диаметра (до 1420 мм), толщиной стенки до 40 мм и длиной до 18,5 м, которые применяются для строительства современных магистральных трубопроводов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Седых А. М. Труды XIII международной научно-практической конференции «Трубы-2005». Часть I / Седых А. М. – Челябинск : РосНИТИ, 2005. – С. 21–26.
2. Шевакин Ю. Ф. Производство труб / Ю. Ф. Шевакин, А. П. Коликов, Ю. Н. Райков. – М. : Интернет Инжиниринг, 2005. – 568 с.
3. Технология производства труб / Потапов И. Н., Коликов А. П., Данченко В. Н. и др. – М. : Металлургия, 1994. – 528 с.
4. Степанов П. П. Инновационное развитие металлургического и трубного комплексов ОМК / П. П. Степанов // Сталь. – 2010. – № 11. – С. 57–60.
5. Дервис В. Труды XIII Международной научно-практической конференции «Трубы-2005» часть I / В. Дервис, Б. Гензер. – Челябинск : РосНИТИ, 2005. – С. 48–49, 105–108.
6. Пинчук А. В. О развитии производства труб / А. В. Пинчук, Л. А. Кондратов // Сталь. – 2011. – № 5. – С. 51–55.
7. Шинкин В. Н. Моделирование процесса формовки заготовки для труб большого диаметра / В. Н. Шинкин, А. П. Коликов // Сталь. – 2011. – № 1. – С. 54–58.
8. Шинкин В. Н. Механика сплошных сред / В. Н. Шинкин. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2010. – 237 с.

Шинкин В. Н. – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой НИТУ «МИСиС»;

Коликов А. П. – д-р техн. наук, проф. НИТУ «МИСиС».

НИТУ «МИСиС» – Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», г. Москва, Россия.

E-mail: apkolikov@mail.ru