

УДК 621.774.621.643

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА. СООБЩЕНИЕ 1

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

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

²ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности «РосНИТИ»
(454139, Россия, Челябинск, ул. Новороссийская, 30)

³Старооскольский 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 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. Данную методику рекомендовано применять 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: 10.17073/0368-0797-2016-7-455-461

Важнейшей составляющей отечественного топливно-энергетического комплекса является магистральный трубопроводный транспорт, для строительства которого используются сварные трубы большого диаметра [1 – 3].

Для прокладки сухопутных и подводных морских участков трубопроводов применяются сварные трубы диаметром 1220 и 1420 мм, толщиной стенки до 43 мм, длиной до 18,3 м повышенной эксплуатационной надежности, обеспечивающие рабочее давление в газопроводах более 10 МПа [1 – 3]. В мировой и отечественной практике трубного производства утвердился процесс получения сварных одношовных труб с формовкой на прессах по схеме JCO (в литературе встречается аббревиатура JУОЕ), разработанный компанией SMS Meer [4].

В последние годы ужесточились требования к качеству труб большого диаметра по геометрическим размерам концевых участков, которые выявляются при прокладке морских трубопроводов, поскольку на барже-укладчике осуществляют поперечную сварку стыков стальных труб. В работе [5] отмечено, что

в поперечном многослойном сварном шве возникают растягивающие напряжения по всей его толщине как в тангенциальном, так и в поперечном направлениях, и на качество сварного соединения оказывает влияние взаимное расположение (относительное смещение) кольцевых кромок труб [6].

В связи с этим особую важность имеют исследования по оценке напряженно-деформированного состояния металла в трубах, особенно концевых участков, а также исследования геометрических дефектов в виде отклонения от теоретической окружности, кривизны, смещения кромок и др. Основную роль в их появлении играет технология формовки (калибровка инструмента, режимы деформации) трубной заготовки, а также способы калибрования труб по внутреннему диаметру.

На практике, в случае выявления геометрических дефектов, таких как отклонение от теоретической окружности, кривизна и смещение кромок, трубы повторно направляются на операцию экспандирования. Поэтому для рассмотрения были взяты трубы, произведенные на

ТПА 1420 за четыре года (~ 200 тыс. т) и повторно прошедшие операцию экспандирования [7].

Наиболее вероятной причиной высокого процента дефектов на трубах является нерациональный профиль матрицы на прессе подгибки кромок. Например, на практике подгибку кромок на сортаменте диаметром 820 мм, 1220 мм можно осуществить на двух разных гибочных матрицах. В интервале толщин стенок от 8 до 14 мм превагирует один профиль гибочной матрицы, а свыше 14 мм – другой, которые обеспечивают различные по величине радиус и ширину прикромочной зоны листовой заготовки. В этом случае при уменьшении радиуса прикромочной зоны увеличится вероятность образования протечек на определенном диапазоне толщин стенок трубы при технологической сварке кромок и образования высоких швов, а при увеличении радиу-

са прикромочной зоны повышается вероятность отклонения от теоретической окружности, так как при сварке внутреннего и наружного шва геометрия трубы изменяется.

По результатам анализа выявлено, что при увеличении диаметра и толщины стенки трубы процент геометрических дефектов снижается, при этом наибольшее количество геометрических дефектов (более 10 %) было отмечено на трубах типоразмера $D_T \times S_T = 559 \times 15,9$ мм (рис. 1).

Отклонение профиля сформованной трубной заготовки от требуемого профиля готовой трубы определяется также напряженно-деформированным состоянием металла по всему технологическому переделу: формовка прикромочной зоны листа → формовка листовой заготовки в *J*-образный профиль на прессе шаговой формовки → формоизменение *J*-образного профиля в *O*-образный в сборочно-сварочном стане → сварка готового профиля с наложением наружных и внутренних швов → калибрование трубы в экспандере.

Формирование качественной геометрии трубы (ГОСТ 2029-85) по технологическому переделу «лист – труба» начинается в кромкогибочном гидравлическом прессе, в котором сформованный профиль прикромочных участков трубной заготовки должен обеспечить плавное сопряжение с основным периметром трубы на прессе шаговой формовки.

На рис. 2 представлена последовательность операций подгибки кромок на прессе. После позиционирования листа в очаге деформации система управления запускает рабочий цикл прессы: на левом и правом гибочных блоках одновременно происходит подъем листовой заготовки 3 рабочими гидроцилиндрами зажимных и гибочных балок, синхронно с ними подъемные ролики поднимают лист. Подъем листа продолжается до тех пор, пока подвижная зажимная балка (траверса) 4 не подведет лист к верхней прижимной неподвижной балке (траверсе) 5 (рис. 2, б). Далее зажимные ци-

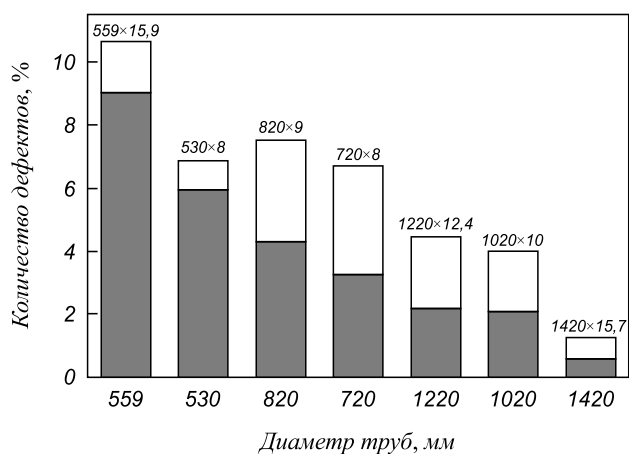


Рис. 1. Распределение геометрических дефектов в трубах большого диаметра: темная область относится к среднему значению количества дефектов, светлая – к максимальному количеству дефектов для данного типоразмера труб

Fig. 1. Distribution of geometrical defects in large diameter pipes. The shaded area refers to the average number of defects, and the open – to the maximum number of defects for a given size of pipes

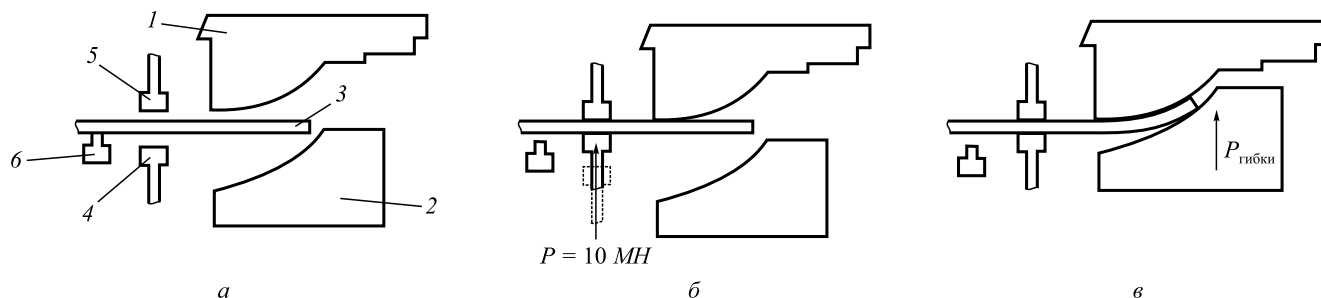


Рис. 2. Последовательность операций подгибки кромок на прессе:

- a* – перемещение листа по рольгангу в зону гибки; *б* – схема фиксирования листа в очаге деформации;
- в* – схема формования кромки листа; 1, 2 – верхний и нижний рабочие инструменты (матрицы) соответственно; 3 – листовая трубная заготовка; 4 – подвижная зажимная траверса; 5 – неподвижная траверса; 6 – рольганг

Fig. 2. The sequence of operations of edges bending on the press:

- a* – moving the sheet on the roller conveyor to the bending zone; *б* – scheme of fixing the plate in the deformation zone;
- в* – scheme of sheet edge forming; 1, 2 – upper and lower tools (dies) respectively; 3 – sheet round billet; 4 – movable clamping traverse; 5 – immobile traverse; 6 – roller conveyor

линдров создают необходимое усилие для зажатия листа (гидросистема поддерживает это усилие до окончания процесса гибки) и рабочие цилиндры нижней балки перемещают инструмент 2 – происходит формовка кромки листа по контуру верхнего инструмента 1 до тех пор, пока усилие гибки $P_{гибки}$ (рис. 2, в) не достигнет установленного значения. Гидросистема выдерживает давление на протяжении определенного времени, после чего производит разгрузку зажимных балок, опуская их с рабочим инструментом 2 в исходное положение. Одновременно подъемные ролики опускают лист на уровень подводящего и отводящего рольгангов б и в этот момент происходит распруживание кромок в результате действия остаточных напряжений [8]. Затем лист перемещается на следующий шаг формовки и операция повторяется на всей длине листовой заготовки.

В настоящее время для получения качественных труб большого диаметра, наряду с традиционными методами разработки эффективных режимов и калибровки прессового инструмента, широко применяется аналитический метод конечных элементов [9 – 12].

В работах [13, 14] представлена разработанная авторами математическая модель (с применением метода конечных элементов) формоизменения металла на кромкогибочном прессе, а также алгоритм расчета глубины опускания пуансона, по величине которого проверяется высота подгибки кромок $H_{кф}$ после распруживания. Это что позволяет определить, обеспечивается ли при данной калибровке инструмента и настройке кромкогибочного пресса необходимый профиль для последующего формоизменения трубной заготовки на прессе шаговой формовки.

Построение и численный анализ реализации данного метода проведены в несколько стадий: построение геометрической модели листовой заготовки и инструмента → реализация расчетных численных схем → выбор алгоритма → практическая реализация полученных результатов.

В предлагаемой модели рассматривается симметричный очаг формовки кромок с двух сторон листовой заготовки на кромкогибочном прессе. Принято, что модель деформируемого материала упругопластическая [8], контакт между листом и бойками точечный, переход от деформируемого к не деформируемому участкам происходит по касательной. Допустимое усилие прессы на один гибочный блок составляет 40 МН. При расчете в выбранной системе координат погонное усилие составляет $[P] = 8,9$ кН/мм (при рабочей длине гибочного блока 4500 мм).

Для определения высоты подгибки кромок листа и усилия выбран полный факторный эксперимент (ПФЭ) – схема $4^1 \cdot 3^1 \cdot 8^1$, количество численных экспериментов – 96.

В ПФЭ были выбраны следующие факторы: местоположение требуемого радиуса гибочной матрицы $X_i = 150, 175, 200, 220$ мм; толщина листовой заготовки

$S_{л} = S_{т} = 8,0 \dots 36$ мм с интервалом 4 мм; сопротивление деформации листовой заготовки $\sigma_{т} = 200, 450, 700$ МПа.

Для расчета геометрических размеров формуемой кромки листа применялось математическое моделирование (МКЭ) в виде программного продукта MSC Marc. По результатам расчета с использованием пакета MathCAD были получены уравнения и аппроксимирующие коэффициенты для определения высоты H и ширины подгибки кромок B в зависимости от варьируемых параметров, решение которых выполнено с помощью алгоритмов.

Ниже в качестве примера приведено одно из уравнений, по которому осуществлен расчет глубины опускания пуансона H при формовке кромок:

$$H(S_{т}, X, \sigma_{т}) = 8,094 \cdot 10^{-4} \sigma_{т} S_{т} - 1,641 \cdot 10^{-4} \sigma_{т} X - 5,921 \cdot 10^{-3} \sigma_{т} + 9,661 \cdot 10^{-3} S_{т} X + 3,132 \cdot 10^{-3} X^2 - 0,599 X + 0,124 S_{т} - 0,023 S_{т}^2 + 37,591. \quad (1)$$

Проверка соответствия расчетного значения высоты подгибки кромки $H_{расч}$ прикромочной зоны заготовки проведена путем сравнения с фактическим значением измеренной величины $H_{факт}$ после ее распруживания при изготовлении труб различного сортамента (см. таблицу).

Сравнение результатов расчета геометрических размеров прикромочной зоны после разгрузки (после распруживания) с фактическими данными геометрических параметров данного типоразмера труб показало хорошую сходимость.

С помощью численного моделирования были определены усилия на кромкогибочном прессе. Использовался программный продукт MSC Marc и полный факторный эксперимент со схемой $4^1 \cdot 3^1 \cdot 8^1$, в виде ограничения – погонное усилие $[P] = 8,9$ кН/мм. В качестве факторов использовались следующие параметры: X_i – местоположение требуемого радиуса на рабочем диапазоне верхней гибочной матрицы со значениями 150, 175, 200, 220 мм; $S_{т}$ – толщина листовой заготовки с пределами изменения величин от 8 до 36 мм и интервалом 4 мм; $\sigma_{т}$ – предел текучести листовой заготовки со значениями 200, 450 и 700 МПа.

Для каждого типа гибочных матриц кромкогибочного прессы для расчета усилий определены регрессионные уравнения, например для гибочной матрицы № 3:

$$P(S, X, \sigma_{т}) = 405,41 \cdot 10^{-3} \sigma_{т} S - 1,74 \cdot 10^{-3} \sigma_{т} X - 1,79 \sigma_{т} - 216,13 \cdot 10^{-3} S X + 874,34 \cdot 10^{-3} X + 70,94 S - 269,79; \quad (2)$$

для гибочной матрицы № 4:

$$P(S, X, \sigma_{т}) = 348,76 \cdot 10^{-3} \sigma_{т} S - 14,04 \cdot 10^{-3} \sigma_{т} X - 856,35 \cdot 10^{-6} \sigma_{т}^2 + 1,85 \sigma_{т} - 378,8 \cdot 10^{-3} S X - 2,65 \cdot 10^{-9} X^2 + 6,86 X - 6,77 S + 2,31 S^2 - 553,16. \quad (3)$$

Результаты расчеты высоты подгибки кромки заготовки после ее распруживания, полученные при изготовлении труб различного сортамента (A – расстояние между матрицами на левой и правой стороне листа)

Results of the calculations of the height of billet edge bending after its rebound obtained at manufacture of pipes of various assortment (A – the distance between the dies on the left and right side of the sheet)

Типоразмер труб, $D_T \times S_T$, мм	Класс/категория прочности труб	A , мм	$H_{расч}$, мм	$H_{факт}$, мм	Относительная ошибка, %
530 × 10	K60	1263	41	38 – 42	2,4 – 7,9
630 × 16	K52	1445	56	55 – 58	1,8 – 6,5
720 × 12	K54	1779	42	40 – 43	2,3 – 5,0
820 × 16	K52	1886	78	75 – 81	3,7 – 4,0
1020 × 13	K52	2629	48	46 – 48	0 – 4,3
1220 × 19	K52	3017	78	75 – 82	4,0 – 4,9
1420 × 19	K60	3764	47	45 – 49	4,1 – 4,4

На рис. 3 приведены результаты расчета погонного усилия подгибки кромок по уравнению (3), анализ которых показывает, что при одной и той же настройке кромкогибочного пресса ($X = const$) с увеличением толщины стенки листовой заготовки S_T разность по усилию увеличивается в интервале механических свойств одной марки стали, а при увеличении размера X погонное усилие подгибки снижается. Аналогичные результаты получены для всего комплекта гибочных матриц, существующих на ТЭСА1420, с определением предельных величин погонных усилий, при которых процесс подгибки кромок не рекомендуется осуществлять. Например, для гибочной матрицы № 4 эти параметры находятся в интервале толщин от 41 до 44 мм; предела текучести $\sigma_T = 630 - 700$ МПа; местоположение требуемого радиуса X от 180 до 320 мм.

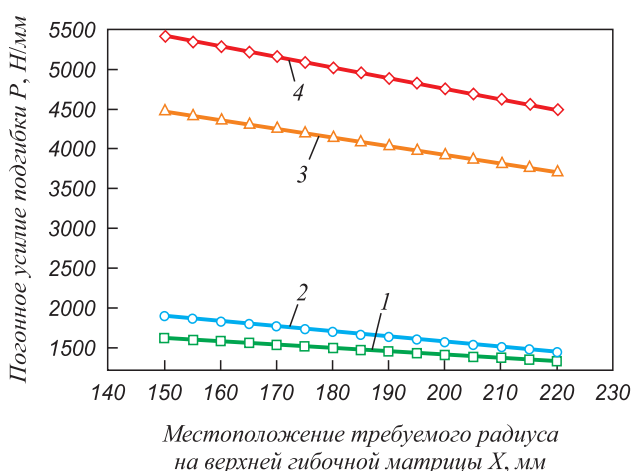


Рис. 3. Изменение погонного усилия подгибки в пределах одной марки стали при:
 1 – $S_T = 8$ мм, $\sigma_T = 450$ МПа; 2 – $S_T = 8$ мм, $\sigma_T = 558$ МПа;
 3 – $S_T = 20$ мм, $\sigma_T = 450$ МПа; 4 – $S_T = 20$ мм, $\sigma_T = 558$ МПа

Из анализа полученных регрессионных уравнений усилия подгибки были определены диапазоны соотношений толщин стенок, механических свойств и местоположения радиуса, при которых процесс подгибки кромок осуществляется нестабильно. Так, например, при формовке на гибочной матрице № 2 (см. рис. 3) кромки листа с пределом текучести от 630 до 700 МПа, в интервале толщин стенок от 32 до 36 мм и радиусом верхней гибочной матрицы от 150 до 175 мм гибку кромок не рекомендуется проводить. В результате аналитических расчетов установлено, что при подгибке кромок листа на всем диапазоне варьируемых параметров выполняется условие возможности изготовления труб на ТЭСА 1420. При этом максимальное усилие подгибки меньше предельно допустимого усилия пресса на 15,5 %.

Известно, что на качество труб (его допустимых геометрических характеристик по профилю) влияет неравномерность напряженно-деформированного состояния и остаточные напряжения в металле, возникающие в процессе формовки листовой заготовки и при дальнейших операциях изготовления труб [5, 8, 12].

Ниже приведены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния в программном комплексе DEFORM-3D формируемой кромки листовой заготовки. На рис. 4 показаны схема сборки модели и элементы конечно-элементной сетки, которая состояла из 35 800 элементов. Время расчета операции подгибки кромок составило 3 ч.

Распределение эквивалентных напряжений и интенсивности напряжений при подгибке кромок и после распруживания показано рис. 5, 6.

Расчет интенсивности напряжений (см. рис. 6) производился по формуле [8]

$$\sigma_{ин} = \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (4)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения.

Fig. 3. Change of hem efforts within the same steel grade at:

1 – $S_{UTS} = 8$ мм, $\sigma_{UTS} = 450$ МПа; 2 – $S_{UTS} = 8$ мм, $\sigma_{UTS} = 558$ МПа;
 3 – $S_{UTS} = 20$ мм, $\sigma_{UTS} = 450$ МПа; 4 – $S_{UTS} = 20$ мм, $\sigma_{UTS} = 558$ МПа

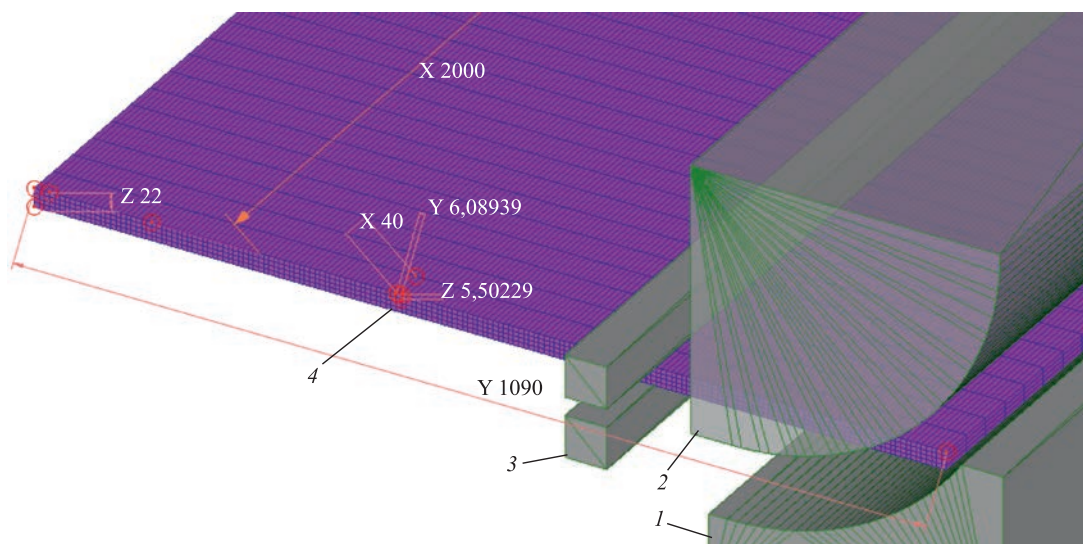


Рис. 4. Размеры заготовки и элемента сетки:
1, 2 – нижний и верхний деформирующие инструменты соответственно; 3 – прижимные планки; 4 – листовая заготовка

Fig. 4. Dimensions of the blank and the grid element:
1, 2 – lower and upper deforming tools respectively; 3 – clamp bars; 4 – sheet billet

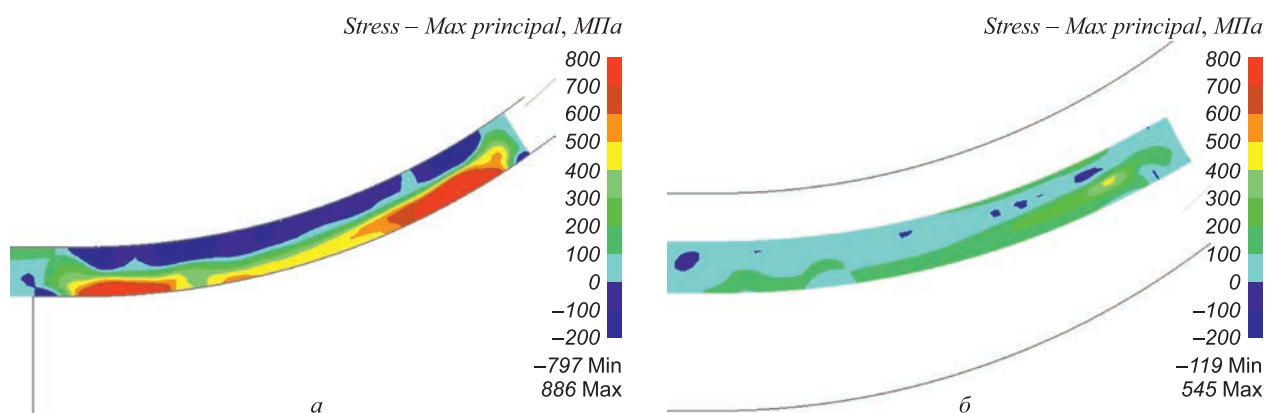


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений:
а – в конце операции подгибки кромок; б – после распружинивания кромок

Fig. 5. Distribution of equivalent stress:
а – at the end of edges bending; б – after edge rebound

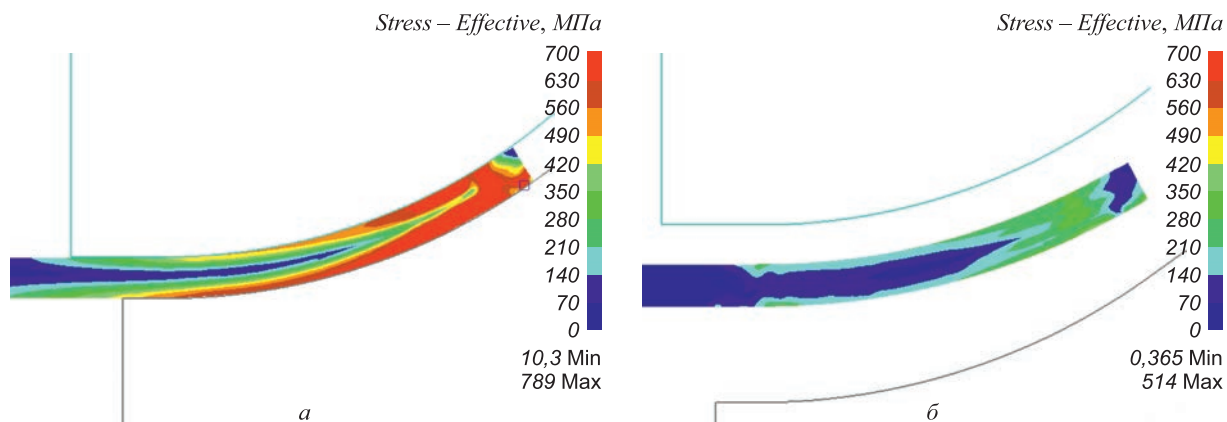


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений:
а – в конце операции подгибки кромок; б – после распружинивания кромок

Fig. 6. Distribution of the stress intensity:
а – at the end of edges bending; б – after edge rebound

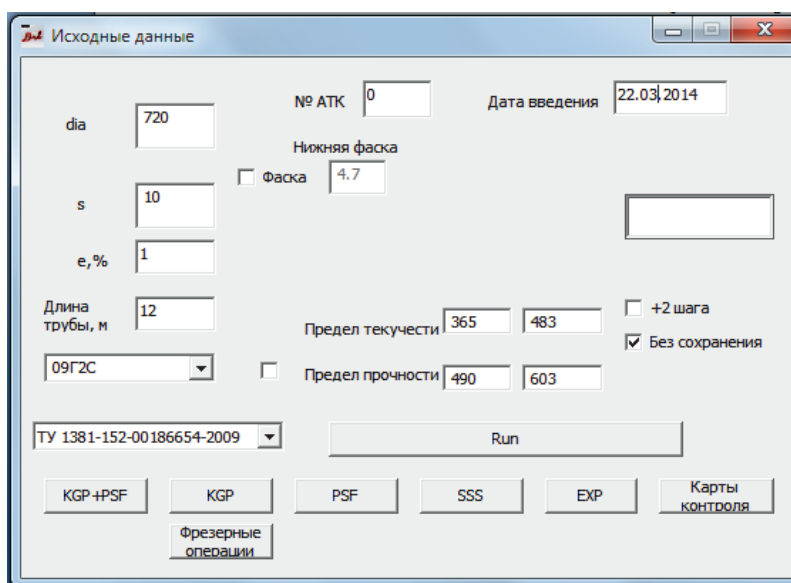


Рис. 7. Общий вид диалогового окна для расчета технологических параметров

Fig. 7. General view of the dialog window for technological parameters calculations

Анализ результатов по распределению напряженного состояния кромки показал, что характер распределения $\sigma_{\text{экр}}$ по ширине кромки неравномерный, при этом максимальные остаточные напряжения составляют $0,70 - 0,75\sigma_T$. Это может привести к не параллельности соединения кромок в сборочно-сварочном стане и некачественному наложению продольного сварного шва кромок.

Результаты формализации полученных алгоритмов и математической модели расчета параметров сформированной кромки листовой заготовки для получения любого типоразмера труб $D_T \times S_T$ представляются в виде автоматизированной системы расчета и данных в текстовом формате (MS Word) (рис. 7) [15].

Исходными данными являются следующие параметры: диаметр трубы, толщина стенки и класс прочности трубы или марка стали.

Программный продукт предназначен как для составления технологических карт на требуемый сортамент, так и для анализа возможности производства данного сортамента труб и определения профиля трубной заготовки при фактических ходах пуансона на кромкогибочном прессе.

Предусмотрено представление полученных данных в текстовом формате (MS Word) и архивация данных.

Применение программы позволяет в несколько раз сократить время на составление технологических карт по изготовлению прямошовных сварных труб большого диаметра на ТЭСА 1420.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
2. Katsumi M., O. Kenji O. Steel Products for Energy Industries // JFE Technical Report. 2013. Vol. 43. No. 18 (March). P. 1 – 11.

3. Осадчий В.Я., Коликов А.П. Производство и качество стальных труб. – М.: Изд-во МГУПИ, 2012. – 370 с.
4. Дерикс В., Гензер Б. Новые технологии экономичного и гибкого производства труб большого диаметра // Тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Трубы-2005». Ч. 1. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2005. С. 105 – 108.
5. Хажинский Г.М. Механика мелких трещин и надежность элементов трубопроводов. – М.: ИНЭК, 2007. – 295 с.
6. Kishiguchi T., Hosoda H., Ikuno Y. etc. Pipe end round equipment and control system (PER-FECTS) // Chin-Niittetsu-Sumikin Engineering Gino. 2013. Vol. 4. P. 39 – 45. Яп.
7. Звонарев Д.Ю. Совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм: Дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2015.
8. Коликов А.П., Романцов Б.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. – 451 с.
9. Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения. – М.: Машиностроение, 2007. – 106 с.
10. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. // В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.
11. 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.
12. 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.
13. 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 – 67.
14. 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.
15. ZV JCO: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660023 / Д.Ю. Звонарев; заявл. 27.08.2013; опублик. 20.12. 2013.

Поступила 6 апреля 2016 г.

MATHEMATICAL MODEL OF PLASTIC FORMING OF THE SLAB FOR LARGE DIAMETER WELDED PIPES. REPORT 1

A.P. Kolikov¹, D.Yu. Zvonarev², I.M. Taupek³, S.V. Kadil'nikov¹, M.R. Galimov¹

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

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

³Sary 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 welded pipe, forming, edge, round billet, flanging press, JCO-press, depth of punch lowering, calibration of press instrument.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-455-461

REFERENCES

- Efron L.I. *Metallovedenie v «bol'shoi» metallurgii. Trubnye stali* [Metallography in "large" metallurgy. Pipe steels]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.).
- M. Katsumi, O. Kenji. Steel products for energy industries. *JFE Technical Report*. 2013, vol. 43, no. 18, pp. 1–11.
- Osadchii V.Ya., Kolikov A.P. *Proizvodstvo i kachestvo stal'nykh trub* [Production and quality of steel pipes]. Moscow: Izdatel'stvo MGUPI, 2012, 370 p. (In Russ.).
- Deriks V., Genzer B. New technologies of cost-effective and flexible production of large diameter pipes. In: *Trudy XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Truby-2005"* [Proceedings of the XIII Intern. Sci.-Pract. Conf. "Pipes-2005"]. Part. 1. Chelyabinsk: OAO "RosNITi", 2005, pp. 105–108. (In Russ.).
- 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.).
- T. Kishiguchi, H. Hosoda, Y. Ikuno etc. Pipe end round equipment and control system (PER-FECTS). *Chin-Niittetsu-Sumikin Engineering Gino*. 2013, vol. 4, pp. 39–45.
- Zvonarev D. Yu. *Sovershenstvovanie protsessov podgibki kromok i shagovoi formovki svarnykh trub bol'shogo diametra dlya obespecheniya vysokoi tochnosti razmerov i form. Diss. kand. tech. 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, 2015. (In Russ.).
- Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem. Uchebn.* [Theory of metal processing by pressure. Textbook]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2015, 451 p. (In Russ.).
- Chernyavskii A.O. *Metod konechnykh elementov. Osnovy prakticheskogo primeneniya* [Finite element method. Fundamentals of practical application]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 106 p. (In Russ.).
- 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.).
- 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.).
- 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.
- Osadchii V.Ya., Gaas E.A., Zvonarev D.Yu., Kolikov A.P. Shaping of thick sheet in the production of welded large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2014, no. 5, pp. 374–378.
- 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. *Chernyye metally*. 2015, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.).
- 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 06, 2016