УДК 621.771.01: 519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-6-253-46-53

*Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев, В. Або-Шакра, Д. В. Шагоян***ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУАНСОНА ПРЕССА ШАГОВОЙ ФОРМОВКИ
НА НДС ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Методами конечно-элементного моделирования изучено влияние ширины пуансона прессы шаговой формовки на напряженно-деформированное состояние в трубной заготовке прямошовных труб большого диаметра из стали X70. Определена кинетика изменения величины деформаций и напряжений в течение одного шага формования.

Ключевые слова: сталь, трубная заготовка, пошаговая формовка, напряженно-деформированное состояние, пуансон, деформация, метод конечных элементов.

*L. M. Gurevich, V. F. Danenko, S. P. Pisarev, V. Abo-Shakra, D. V. Shagoyan***INFLUENCE OF PARAMETERS OF PUNCH OF STEP FORMING PRESS
ON STRESS-STRAIN STATE OF PIPE BILLET****Volgograd State Technical University**

The influence of the dimensions of the punch of a step-forming press on the stress-strain state in a pipe billet of longitudinal welded pipes of large diameter has been studied by the methods of finite element simulate. Pipes are made of steel X70. The kinetics of changes in the magnitude of deformations and stresses during one step of forming has been determined.

Keywords: steel, pipe billet, step-by-step forming, stress-strain state, punch, deformation, finite element simulate.

К сварным прямошовным трубам большого диаметра предъявляются повышенные требования, направленные на обеспечение качества монтажных работ и безопасности при эксплуатации. Важную роль при этом играют не только прочностные свойства стали, но и набор операций технологического процесса и технологические параметры операции формования, которые, во многом, определяют геометрические параметры трубной заготовки и напряженно-деформированное состояние (НДС). Трубы с большой толщиной стенок затруднительно получить трехвалковой формовкой труб из-за недостаточной жесткости верхнего формующего вала. Поэтому в АО «Выксунский металлургический завод», ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» и АО «Ижорский трубный завод» эксплуатируют линии трубоэлектросварочных агрегатов (ТЭСА) по производству прямошовных труб большого диаметра по JCOE-процессу или UOE-процессу [1]. Поэтому совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки заготовок сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм является актуальной задачей [2].

Для исследования величины пластических деформаций и остаточных напряжений при

пошаговой формовке с различными технологическими параметрами разработаны экспериментально-аналитические методы с учетом ряда допущений и упрощений [3–5]. В технической литературе приводится несколько аналитических моделей расчета профиля прессового инструмента с учетом требуемых размеров труб [6, 7], производимых по схеме JCOE, однако на практике распруживание заготовки после каждого шага затрудняет проверку адекватности результатов расчета радиуса сформованного участка заготовки. Авторы [4] разработали геометрическую схему формовки листовой заготовки на одном прессе, математическую модель и алгоритм расчета с некоторыми допущениями глубины опускания пуансона Н, по величине которой проверяются фактические значения радиуса и высоты подгибки кромки, сформованной на каждом участке заготовки после распруживания. Решение задачи проводится с помощью системы уравнений, которые составляются для каждого поперечного сечения, и осуществляется с помощью алгоритмов, позволяющих рассчитывать глубину опускания пуансона Н при формовке кромок листа и формовке листовой заготовки в J-образную форму.

В. И. Шинкин предложил математические модели последовательных процессов формовки заготовки на кромкогибочном прессе и на прессе пошаговой формовки, экспандирования трубной заготовки, и аналитические формулы расчета их технологических параметров [8]. Полученные модели достаточно громоздки и не учитывают изменение свойств стали в процессе пластического деформирования. Несовершенство способов аналитического расчета, недостаточное соответствие расчетных схем реальным условиям работы, погрешность задания граничных условий и определения нагрузок на заготовку, меняющихся в процессе перемещения формирующего инструмента, дают существенные неточности в оценке напряжений и деформаций.

По мере повышения быстродействия компьютерной техники для оптимизации параметров шаговой формовки прямошовных сварных труб большого диаметра стали использовать различные пакеты компьютерных программ: LSDYNA 970 для определения остаточных напряжений в трубах различного типа в зависимости от технологии их производства [9], DEFORM-3D для оценки неравномерности напряженно-деформированного состояния металла при пластическом формоизменении листовой заготовки по схеме JCOE в готовую трубу на всех стадиях технологического передела [10, 11], SIMULIA/Abaqus [12] для оценки влияния толщины стальных листов и расстояния между центрами деформирующих опор при шаговой

формовке на НДС трубной заготовки. Для ускорения процесса моделирования процесса деформирования крупногабаритной трубной заготовки используют ряд упрощений, например, переход к плоским схемам нагружения, или огрублению конечно-элементной сетки.

В настоящей работе определялись методом 3D конечно-элементного моделирования в пакете MSC Software Marc изменение величины напряжений и деформаций по толщине стенки трубной заготовки по мере погружения пуансона с различными геометрическими параметрами при получении сварных прямошовных труб методом пошаговой формовки.

Схема конечно-элементного моделирования показана на рис. 1. При моделировании пуансон, толкатель, стол пресса и шарнирные деформирующие опоры принимались жесткими телами. Листовая заготовка выполнялась из деформируемого материала с механическими свойствами, соответствующими стали X70 с модулем Юнга 200 ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu=0.3$. Для описания упрочнения материала в процессе наклепа вводилась зависимость между повышающимся пределом текучести и величиной пластической деформации (рис. 2). Вводимые механические свойства стали определяли испытанием на растяжение образцов стали производства фирмы Salzgitter (Германия) с различной ориентировкой относительно направления прокатки листов. Толщину листа изменяли при моделировании от 22 до 42,5 мм.

Рис. 1. Схема конечно-элементного моделирования шаговой формовки трубной заготовки (а) и увеличенная зона деформирования листа (б):

1 – листовая заготовка; 2 – пуансон; 3 – толкатель; 4 – стол пресса; 5 – шарнирные деформирующие опоры

Рис. 2. Зависимость между повышающимся пределом текучести и величиной пластической деформации

При моделировании изменяли ширину пуансона от 500 до 600 мм. Величина опускания пуансона составляла 25 мм от нейтрального исходного положения, смещение заготовки по столу после каждого цикла деформирования – 220 мм. Графики циклических перемещений пуансона для деформирования локального участка трубной заготовки и толкателя для перемещения вдоль стола при моделировании процесса шаговой формовке показаны на рис. 3 и 4.

Для формования левой половины трубной заготовки используется девять циклов опускания пуансона, после чего заготовка перемещается в крайнее левое положение, в котором пуансон начинает формировать участок трубной заготовки вблизи правой изогнутой кромки (рис. 5).

Рис. 3. График циклических перемещений пуансона для деформирования локального участка трубной заготовки

Рис. 4. График циклических перемещений толкателя для перемещения вдоль стола

Рис. 5. Положение пуансона после окончания восьми (а) и девяти циклов (б) шагового формирования трубной заготовки

При создании конечно-элементной сетки применяли 6, 7 и 8 слоев соответственно для листов толщиной 22, 32 и 42,5 мм. В ходе моделирования фиксировалось изменение напряженно-деформированного состояния листовой заготовки при ее деформировании и разгрузении.

В таблице приведены максимальные и минимальные значения горизонтальной составляющей остаточных напряжений после окончания девятого цикла деформирования и подъема пуансона в зависимости от толщины листа и ширины пуансонов.

Значения горизонтальной составляющей остаточных напряжений после окончания девятого цикла деформирования

Номер модели	Толщина листа, мм	Ширина пуансона, мм	Горизонтальная составляющая напряжений, МПа	
			min	max
1	30	500	-474	503
2	30	550	-408	305
3	30	600	-492	349
4	22	500	-239	424
5	22	550	-207	190
6	22	600	-393	376
7	42.5	500	-294	383
8	42.5	550	-265	399
9	42.5	600	-454	313

Как видно из таблицы, первоначально увеличение ширины пуансона до 550 мм вызывает падение остаточных напряжений, но дальнейшее увеличение ширины пуансона приводит к росту остаточных напряжений. Для выявления причин немонотонного изменения зависимости уровня остаточных напряжений от ширины пуансона рассмотрим более подробно картины изменения распределения напряжений и деформаций в течение одного цикла движения пуансона.

Увеличение ширины пуансона, помимо увеличения длины зоны деформации, приводит к значительному изменению картины пластической деформации (рис. 6 и 7): гладкая колоколообразная кривая с экстремумом, совпадающим с вертикальной осью пуансона шириной

500 мм, при увеличении ширины пуансона 550 мм при всех промоделированных толщинах стального листа приобретала на расстоянии около 100 мм от вертикальной оси еще один максимум. При ширине пуансона 600 мм на кривых для всех слоев листа (1 слой на верхней поверхности, 6 слой на нижней поверхности листа толщиной 22 мм, 8 слой на нижней поверхности листа толщиной 42,5 мм) сформировались два симметричных экстремума с деформациями растяжения. Расстояние между этими экстремумами изменялось от 375 мм на верхней поверхности листа до 300 мм на нижней поверхности. Формирование этих экстремумов связано с вдавливанием в лист шарнирных деформирующих опор (рис. 7).

Рис. 6. Распределение пластической деформации в очаге по сечению листа толщиной 22 мм при ширине пуансона 500 мм (*a*), 550 мм (*б*) и 600 мм (*в*):
1–6 слои листа, соответственно 1-й слой на верхней поверхности, 6 – на нижней

а

б

в

Рис. 7. Распределение пластической деформации в очаге по сечению листа толщиной 42,5 мм при ширине пуансона 500 мм (а), 550 мм (б) и 600 мм (в): 1–8 слои листа, соответственно 1-й слой на верхней поверхности, 8-й – на нижней

Для этих зон с повышенным уровнем пластической деформации характерен и повышенный уровень остаточных напряжений растяжения, которые могут привести к снижению работоспособности трубы (рис. 8).

Методы моделирования позволяют просле-

дить формирование зон деформации в областях контакта с шарнирными деформирующими опорами по мере опускания пуансона шириной 600 мм (рис. 9). Процессы смятия листа между пуансоном и шарнирными опорами начались на последних 10 % величины опускания пуансона.

Рис. 8. Визуализация распределения горизонтальных составляющих остаточных напряжений по сечению листа толщиной 30 мм при использовании пуансона шириной 600 мм (по стрелкам зоны повышенных остаточных напряжений за счет вдавливания в поверхность шарнирных деформирующих опор)

Рис. 9. Изменение распределения горизонтальной составляющей пластической деформации на верхней (а) и нижней поверхности (б) листа толщиной 42,5 мм по мере перемещения пуансона шириной 600 мм: 1 – опускание пуансона 19,8 мм; 2 – опускание пуансона 20,9 мм; 3 – опускание пуансона 22 мм

Таким образом, при использовании существующего расстояния между шарнирными деформирующими опорами максимальная ширина пуансона не может превышать 550 мм для всех толщин деформируемого листа.

Выводы:

1. Проведено моделирование шаговой формовки половины трубной заготовки с толщинами исходного стального листа 22 мм, 30 мм и 42,5 мм при изменении ширины рабочей части пуансона от 500 до 600 мм. Показан немонотонный характер зависимости уровня остаточных напряжений от ширины пуансона, при которой минимальные значения напряжений наблюдались при ширине пуансона 550 мм.

2. Визуализация горизонтальной составляющей пластической деформации показывает, что при ширине пуансона 600 мм на кривых для всех слоев листа сформировались два симметричных экстремума с деформациями растяжения, появление которых связано с вдавливанием в нижнюю поверхность листа шарнирных деформирующих опор. Расстояние между экстремумами изменялось от 375 мм на верхней поверхности листа до 300 мм на нижней поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология и оборудование трубного производства / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
2. Звонарев, Д. Ю. Совершенствование процессов подгибки кромок и шаговой формовки сварных труб большого диаметра для обеспечения высокой точности размеров и форм: автореферат дис. ... кан. техн. наук / Звонарев Д. Ю. – Челябинск, 2015. – 23 с.
3. Шинкин, В. Н. Механика сплошных сред для металлургов / В. Н. Шинкин. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 628 с.
4. Осадчий, В. Я. Математическая модель формоизменения листовой заготовки при производстве сварных труб большого диаметра / В. Я. Осадчий, Е. А. Гаас, Д. Ю. Звонарев, А. П. Коликов // Сталь. – 2014. – № 5. – С. 63–66.
5. Звонарев, Д. Ю. Математическое моделирование формоизменения листовых заготовок сварных труб большого диаметра / Д. Ю. Звонарев, В. Я. Осадчий, А. И. Романцов, А. П. Коликов // Сталь. – 2016. – № 6. – С. 45–48.
6. Шинкин, В. Н. Моделирование процесса пластического формоизменения листовой заготовки для производства труб большого диаметра / В. Н. Шинкин, А. П. Коликов // Обработка металлов давлением. – 2011. – № 3. – С. 28.
7. Пинчук, А. В. О развитии производства труб / А. В. Пинчук, Л. А. Кондратов // Сталь. – 2011. – № 5. – С. 51–55.
8. Шинкин, В. Н. Математическое моделирование процессов производства труб большого диаметра для магистральных трубопроводов / В. Н. Шинкин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 4. – № 4 (62).
9. Самусев, С. А. Разработка технологических режимов участка формовки трубной заготовки в линии ТЭСА-1420 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» / С. А. Самусев, А. И. Романцов, К. Л. Жигунов, В. В. Больдт, М. С. Сигида // Производство проката. – 2011. – № 10. – С. 20–28.
10. Неганов, Д. А. Компьютерное моделирование процесса формовки трубной заготовки большого диаметра / Д. А. Неганов, Г. В. Нестеров, А. А. Богач // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 48–55.
11. Коликов, А. П. Оценка напряженно-деформированного состояния металла на основе математического моделирования при производстве труб большого диаметра / А. П. Коликов, Д. Ю. Звонарев, М. Р. Галимов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 9. – С. 706–712.
12. Гуревич, Л. М. Влияние технологических параметров шаговой формовки на НДС трубной заготовки / Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев // Известия ВолгГТУ: научный журнал № 4 (251) / ВолгГТУ. – 2021. – С. 63–68.