Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШАГОВОЙ ФОРМОВКИ НА НДС ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Методами конечно-элементного моделирования изучено напряженно-деформированное состояние в трубной заготовке прямошовных труб большого диаметра из стали X70 при различных технологических параметрах. Определена кинетика изменения усилия деформирования и реакций опор в течение одного шага формования.

Ключевые слова: сталь, трубная заготовка, пошаговая формовка, напряженно-деформированное состояние, реакция опор, усилие, метод конечных элементов.

L. M. Gurevich, V. F. Danenko, S. P. Pisarev

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF STEP FORMING ON STRESS-STRAIN STATE OF PIPE BILLET

Volgograd State Technical University

The stress-strain state in a pipe billet of longitudinal seam pipes of large diameter made of X70 steel has been studied by the methods of finite element modeling under various technological parameters. The kinetics of the change in the deformation force and reactions of the supports during one step of molding have been determined.

Keywords: steel, pipe billet, step-by-step forming, stress-strain state, support reaction, force, finite element method.

Эксплуатационные свойства прямошовных сварных труб, используемых при строительстве магистральных нефте- и газопроводов, в значительной степени определяют способность трубопроводов обеспечить транспортировку заданных объемов углеводородных продуктов. Кроме характеристик трубных сталей на эксплуатационные свойства труб оказывает влияние технология их изготовления, определяющая распределение пластических деформаций

и уровень остаточных напряжений в металле. Используемые на трубных заводах России технологии изготовления сварных прямошовных труб диаметром 20–56 дюймов (от 508 до 1422 мм) включают формовку труб (сгибание различными способами листа с предварительно отфрезерованной X-образной разделки под сварку на кромках в цилиндрическую заготовку), сборку стыка, сварку технологического шва в среде защитных газов и двухстороннюю сварку про-

дольного шва под флюсом [1]. Существует три наиболее часто используемых альтернативных варианта получения цилиндрической заготовки труб большого диаметра из листа:

- валковая формовка (схема RBE швейцарской компании Haeusler);
- шаговая формовка (JCOE-процесс);
- прессовая формовка (UOE-процесс).

Трехвалковая формовка труб, применяемая на АО «Волжский трубный завод» и «Загорский трубный завод», обеспечивает более высокую равномерность распределения остаточных напряжений и деформаций, чем шаговая, но не позволяет получать трубы с большой толщиной стенок из-за недостаточной жесткости верхнего формующего вала. Поэтому в АО «Выксунский металлургический завод», ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» и АО «Ижорский трубный завод» эксплуатируют линии ТЭСА по производству прямошовных труб большого диаметра по JCOE-процессу или UOE-процессу. Формование заготовок производится по JCOE-процессу в условиях упруго-пластического изгиба материала листа, что определяет значительное ее пружинение и изменение зазора между кромками.

Считается [2], что наиболее правильную геометрию трубной заготовки можно получить только используя формовку листовой заготовки в вальцах. Однако для таких прямошовных труб характерен узкий размерный диапазон по отношению толщины стенок к диаметру (не более 0,033) из-за ограничения по максимально допустимому давлению в гидроцилиндрах (предельному усилию гибки) и про-

гибу верхнего вала. Для исследования силовых факторов, величины пластических деформаций и остаточных напряжений при пошаговой формовке с различными технологическими параметрами разработаны экспериментально-аналитические методы с учетом ряда допущений и упрощений [3–6].

С появлением и развитием компьютерной техники для оптимизации параметров технологических процессов получения 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 [7], DEFORM-3D для оценки неравномерности напряженно-деформированного состояния металла при пластическом формоизменении листовой заготовки по схеме JCO в готовую трубу на всех стадиях технологического передела [8, 9].

Одним из важнейших показателей, характеризующих возможность использования имеющегося оборудования для производства толсто-стенных труб методом пошаговой формовки, являются усилие деформирования и возникающие реакции на радиусных опорах.

В настоящей работе определялись методом конечно-элементного моделирования силовые параметры, необходимые для получения сварных прямошовных труб с различной толщиной стенок методом пошаговой формовки и распределение в них напряженно-деформированного состояния (НДС).

Схема конечно-элементного моделирования показана на рис. 1.

Рис. 1. Схема конечно-элементного моделирования шаговой формовки трубной заготовки:

1 – листовая заготовка; 2 – пуансон; 3 – цилиндрические деформирующие опоры; 4 – цилиндрическая поддерживающая опора

При моделировании пуансон и цилиндрические опоры принимались жесткими телами, а листовая заготовка – из деформируемого материала с механическими свойствами, соответствующими стали X100. Для описания упроч-

нения материала в процессе наклепа использовалась модель Джонсона–Кука:

$$\sigma_Y = \left(A + B \cdot \varepsilon_p^n \right) \left(1 + \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p^n}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right],$$

где A – предел текучести недеформированного материала, B – коэффициент упрочнения, ϵ_p – пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; C – коэффициент зависимости упрочнения от скорости деформирования, n , m , ϵ_0 – параметры модели; $\dot{\epsilon}_0$ и $\dot{\epsilon}_p$ – первые производные по времени величин ϵ_0 и ϵ_p . [10, 11].

Значения параметров в уравнении Джонсона–Кука приведены в таблице. В связи с низкой скоростью деформирования (менее $0,0025 \text{ с}^{-1}$) ее влияние не учитывалось. Длина стальной заготовки 3480 мм. При моделировании не учитывалось изменение исходного состояния листа при подгибке кромок вследствие значительного расстояния очага деформации от кромок.

Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука [10]

Материал	Коэффициенты для модели пластичности					
	A , МПа	B , МПа	m	n	$\dot{\epsilon}_0$, с^{-1}	T_m , K
Сталь X100	1030	449	0,517	0,61	1	1773

Радиус цилиндрических опор 200 мм, а рабочего участка пуансона – 450 мм. Ширина радиусной части пуансона 270 мм.

На первом этапе моделирования при постоянном расстоянии между центрами деформирующих опор 450 мм, изменяли толщину листовой заготовки от 24 до 40 мм. На втором этапе при постоянной толщине листовой заготовки (32 мм) варьировали расстояние между деформирующими опорами от 400 до 500 мм. Скорость опускания пуансона при всех случаях

моделирования – 5 м/с, максимальная величина опускания пуансона 48 мм, при больших толщинах листа или минимальном расстоянии между деформирующими опорами погружение прекращалось при контакте листовой заготовки всей радиусной поверхности пуансона.

В ходе моделирования фиксировалось как изменение напряженно-деформированного состояния листовой заготовки при ее деформировании и разгрузении, так и силовые параметры (усилие нагружения и составляющие вектора реакции деформирующих опор).

Распределение пластических деформаций в очаге деформации на стадии окончания процесса деформирования для различных вариантов моделирования показаны на рис. 2 и 3.

Рис. 2. Распределение растягивающих и сжимающих напряжений в листовой заготовке различной толщины на стадии окончания процесса деформирования (расстояние между центрами деформирующих опор 450 мм): 1 – толщина 20 мм; 2 – 25 мм; 3 – 32 мм; 4 – 40 мм

Рис. 3. Изменение распределения растягивающих и сжимающих напряжений в листовой заготовке толщиной 32 на стадии окончания процесса деформирования при варьировании расстояния между центрами деформирующих опор: 1 – 400 мм; 2 – 450 мм; 3 – 500 мм

Величины растягивающих на внешней поверхности и сжимающих на внутренней поверхности деформаций во всех моделируемых вариантах не превышали 5 %. Однако характер НДС зависит от условий моделирования. Увеличение толщины деформируемой заготовки приводило к значительному росту глубины областей с деформациями более 3 % (рис. 2). Раздвижение опор при постоянной толщине листо-

вой заготовки вызывало как рост протяженности очага деформации, так и глубины деформированного слоя с величиной деформации более 3 % (рис. 3).

Изменение в процессе моделирования толщины стали и расстояния между центрами деформирующих опор приводило к серьезным изменениям в силовых характеристиках, необходимых для изгиба заготовки (рис. 4 и 5).

Рис. 4. Изменение усилия, необходимого для перемещения пуансона при деформировании листовой заготовки различной толщины (расстояние между центрами деформирующих опор 450 мм):
1 – толщина 20 мм; 2 – 25 мм; 3 – 32 мм; 4 – 40 мм

Рис. 5. Изменение усилия, необходимого для перемещения пуансона при деформировании листовой заготовки толщиной 32 мм при варьировании расстояния между центрами деформирующих опор:
1 – 400 мм; 2 – 450 мм; 3 – 500 мм

Как видно из рис. 4 и 5, для всех моделируемых случаев характерен близкий вид кривых, на которых можно выделить два участка: начальный, полого поднимающийся, и конечный, характеризующийся быстрым нарастанием усилия, необходимого для дальнейшего перемещения пуансона. Увеличение толщины деформируемого листа (рис. 4) приводит к росту значений усилий, характерных для начального пологого участка кривой, и возникновению второго участка при меньших величинах перемещения. Увеличение расстояния между центрами деформирующих опор (рис. 5) слабо снижает значения усилий, характерных для начального пологого участка кривой, но резко

увеличивают значения перемещения пуансона, которое необходимо для перехода ко второму участку.

Такой вид кривой не характерен для трехточечного изгиба. Вероятно, формирование второго участка кривых «перемещение пуансона – усилие» не связано с расклинивающим действием, которое создает опускающийся пуансон на деформирующие опоры, что подтверждается изменением величины горизонтальной реакции на деформирующих опорах (рис. 6 и 7). Моменты резкого роста усилия, прикладываемого к пуансону на различных вариантах моделирования, и возрастания горизонтальных составляющих реакции опор хорошо коррелируют.

Рис. 6. Изменение горизонтальной реакции на левой деформирующей опоре при перемещении пуансона, деформирующего листовую заготовку различной толщины (расстояние между центрами деформирующих опор 450 мм):
1 – толщина 20 мм; 2 – 25 мм; 3 – 32 мм; 4 – 40 мм

Рис. 7. Изменение горизонтальной реакции на левой деформирующей опоре при перемещении пуансона, деформирующего листовую заготовку толщиной 32 мм при варьировании расстояния между центрами деформирующих опор:
1 – 400 мм; 2 – 450 мм; 3 – 500 мм

Сложный характер изменения горизонтальной реакции на деформирующих опорах при опускании пуансона вплоть до возникновения реакций, направленных на увеличение расстояний между центрами опор, связано с тем, что они должны уравновесить не только усилия, создаваемые пуансоном, но и момент от силы тяжести, действующей на изгибающуюся стальную листовую заготовку, в которой изменяется положение центра тяжести.

Выводы

1. Методом конечно-элементного моделирования определены силовые параметры, необходимые для получения сварных прямошовных труб с различной толщиной стенок пошаговой формовкой и распределение в них напряженно-деформированного состояния (НДС). Увеличение толщины деформируемой заготовки приводило к значительному росту глубины областей с деформациями более 3 %. Раздвигание деформирующих опор при постоянной толщине листовой заготовки вызывало как рост протяженности очага деформации, так и глубины деформированного слоя с величиной деформации более 3 %.

2. Для всех моделируемых случаев характерен близкий вид кривых, на которых можно выделить два участка: начальный, полого поднимающийся, и конечный, характеризующийся быстрым нарастанием усилия, необходимого для дальнейшего перемещения пуансона. Увеличение толщины деформируемого листа приводит к росту значений усилий, характерных для начального пологого участка кривой и возникновению второго участка при меньших величинах перемещения.

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. Урядов, Р. В. Применение трехвалковой листогибочной машины и установок роликов догибки кромок для производства прямошовных сварных труб большого диаметра с соотношением диаметр/толщина стенки менее 30 / Р. В. Урядов, А. С. Христофоров // сб. тр. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 414–422.
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. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Галкин, В. В. Оценка напряженно-деформированного состояния металла трубных заготовок, изготовленных пошаговой формовкой, методом математического моделирования / В. В. Галкин, А. С. Чебурков, Г. В. Пачурин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 131–131.
10. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th Int. Symp. on Ballistics. – 1983. – P. 541–547.
11. Фрункин, Д. Б. Верификация моделирования процесса экспандирования сварных прямошовных труб большого диаметра, производимых на АО «Волжский трубный завод» / Д. Б. Фрункин, Л. М. Гуревич, И. Л. Пермяков, И. Л. Платонов, А. И. Банников, Р. Е. Новиков // Известия ВолГТУ : научный журнал № 15 (194) / ВолгГТУ. – 2016. – С. 59–63.