ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК: 621.771: 519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-2-237-47-51

Л. М. Гуревич¹, Д. Б. Фрункин², А. А. Истрати¹, В. А. Соннова¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГОЛОВКИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ЭКСПАНДЕРА ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

¹ Волгоградский государственный технический университет

² АО «Волжский трубный завод»

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено моделирование методом конечных элементов работы головки экспандера при калибровании сварных крупногабаритных труб. Определены усилия, необходимые для перемещения деталей силового привода экспандера. Показано, что изменение длины цилиндрической части клиновых сегментов экспандера и величины шага их осевого перемещения изменяет распределение пластической деформации трубной заготовки при постоянстве радиального раздвигания сегментов.

Ключевые слова: экспандер, труба, конечно-элементное моделирование, усилия, деформация, клиновой сегмент, конус.

L. M. Gurevich¹, D. B. Frunkin², A. A. Istrati¹, V. A. Sonnova¹

MODELING THE WORK OF THE HEAD OF A HYDROMECHANICAL EXPANDER FOR WELDED PIPES OF A LARGE DIAMETER

¹ Volgograd State Technical University

² AO Volzhsky pipe plant

Finite element simulate of the operation of the expander head during the calibration of welded bulky pipes was carried out. The forces required to move the parts of the expander power drive are determined. It is shown that a change the length of the cylindrical surface of the wedge segments of the expander and the axial movement step size with constant radial extension of the segment changes the distribution of plastic deformation in the tube billet s.

Keywords: expander, pipe, finite element modeling, forces, deformation, wedge segment, cone.

Одна из тенденций современного рынка газонефтепроводных труб большого диаметра – постоянное ужесточении требований к точности геометрии торцов труб, в частности к величине их овальности (разницы максимального и минимального диаметров). Одной из операций, определяющей конечное геометрическое качество труб, и, в первую очередь, овальность, является операция экспандирования в холодном состоянии. Из-за постоянного снижения максимально допустимой овальности торцов труб в последние два десятилетия производители сварных труб большого диаметра стали отказываться от традиционного экспандирования на прессах-расширителях, в которых калибровка сварных труб осуществляется методом раздачи внутренним гидравлическим давлением,

что позволяло производить калибровку трубы по всей длине с одновременным упрочнением, правкой и гидравлическим испытанием. Пресс-расширитель имел две силовые головки, связанные между собой колоннами, и раскрывающийся штамп. При гидравлической раздаче силовые головки надвигались с двух сторон на трубу, раздавали ее конусами, калибруя и уплотняя тем самым концы труб, затем происходило наполнение водой под высоким давлением. Одновременно вся труба закрывалась разъемными полуштампами, внутренний диаметр которых в закрытом состоянии равнялся требуемому наружному диаметру готовой трубы. При величине экспандирования 1 % исходная овальность труб уменьшалась на 60 %, а при раздаче на 2 % – до 80 % [1]. На запущенных

в последние два десятилетия цехах производства сварных труб большого диаметра используется гидромеханическое экспандирование. Вначале для уменьшения сил трения между головкой экспандера и внутренней стенкой трубы внешние элементы головки экспандера смазываются струями эмульсии из воды и масла, а внутренняя поверхность трубы очищается струями воды. Далее внутрь трубы вводится головка экспандера, которая включает 10–12 сегментов (с наружными цилиндрическими и внутренними клиновыми поверхностями) и сопрягающуюся с ними внутреннюю многогранную усеченную пирамиду. Осевое перемещение гидравлическим приводом пирамиды внутрь сегментов приводит к их раздвиганию в радиальном направлении, соприкосновению с внутренней поверхностью трубы и увеличению локального диаметра трубы. Затем пирамида возвращается в исходное состояние, сегменты сближаются, и головка экспандера перемещается вдоль оси на один шаг, величина которого меньше длины сегментов. После окончания каждого шага процесса экспандирования происходит распруживание стенки трубы, и труба несколько уменьшается в диаметре [2].

Многоступенчатый характер процесса гидромеханического экспандирования затрудняет его эмпирическую оптимизацию, поэтому в последнее десятилетие появилось значительное число публикаций, посвященных моделированию процесса гидромеханического экспандирования. В части из них описана физическая сущность процессов, происходящих при экспандировании, и предложены методики расчета остаточных напряжений и деформаций на основе известных зависимостей сопротивления материалов [3–6].

В других публикациях с различной степенью подробности описаны попытки компьютерного моделирования поведения стенки трубы изменения пластических деформаций и напряжений в металле трубы в процессе экспандирования трубных заготовок, полученных различными вариантами формовки: пошаговая (схема JCO), валковая (схема RBE), на прессах (схема UOE) [7–11]. Ряд работ были посвящены оптимизации процесса экспандирования труб большого диаметра на основе метода компьютерного моделирования условиях АО «Волжский трубный завод» [12–14]. Опубликованные разными авторами приведенные статьи позволяют составить представления о влиянии

процесса экспандирования процессы, происходящие при ступенчатом локальном деформировании трубы, однако они не могут быть использованы при конструировании экспандера, так как не содержат данные об уровне усилий и напряжений в основных деталях головки экспандера, влиянии соотношения длин сегментов и шага головки на однородность пластической деформации по длине экспандированной трубной заготовки. В тоже время увеличение длин сегментов и шага головки позволяет уменьшить общее количество шагов при экспандировании трубы и, следовательно, повысить производительность процесса.

Целью настоящей статьи является определение усилий, необходимых для осевого перемещения привода раздвигания сегментов, а также влияния конструктивных размеров головки экспандера на однородность пластической деформации экспандированной трубной заготовки.

В качестве объекта моделирования выбрана труба внутренним диаметром 1153 мм и толщиной стенки 30,9 мм из стали класса прочности K60 (X70) с пределом текучести около 600 МПа. Механические свойства стали были определены испытанием на растяжение образцов с различной ориентировкой относительно направления прокатки листов [12]. По результатам предшествующих моделирований напряжения и деформации от шага экспандирования не распространяются более 1 м от зоны локального деформирования, поэтому использовали фрагмент трубы длиной 1500 мм. При моделировании (рис. 1) использовалась круглая трубная заготовка, что позволяло выделить чистое влияние только процесса экспандирования. Для радиального раздвигания недеформируемых клиновых сегментов (тела *discrete rigid*) использовалось осевое перемещение абсолютно жесткого конуса (тело *ANALYTICAL RIGID*) с углом 4° между осью и образующей длиной 1500 мм. При моделировании использовались два варианта длин цилиндрической части сегментов – 400 и 450 мм, при длине сегмента 400 мм шаг осевого перемещения головки экспандера составлял 300 мм, а при длине 450 мм – 300 и 350 мм. На обоих концах сегментов выполнялись фаски под углом 20° и длиной 50 мм. График осевого перемещения конуса на двух шагах экспандирования показан на рис. 2, максимальное перемещение сегмента составляло около 20 мм. Пример радиальных перемещений клиновых сегментов на первом и втором шагах

экспандера показан на рис. 3. Для осевого перемещения конуса использовали движение двух управляемых недеформируемых диска (тела Discrete rigid), что обеспечивало возможность непрерывной записи усилия, необходимого для движения конуса. В процессе моделирования фиксировались осевые усилия, осевые и радиальные перемещения недеформируемых элементов и ячеек трубной заготовки, а также напряжения и деформации в стенке трубной заготовки.

Изменение осевого усилия на стадиях первого и второго раздвигания клиновых сегментов показано на рис. 4.

На первом шаге экспандирования увеличение длины клиновых сегментов с 400 до 450 мм приводит к росту максимального осевого усилия, необходимого для перемещения конуса с 23,5 до 25,8 МН. На втором шаге усилие в ос-

Рис. 1. Модель экспандирования трубы: 1 – труба; 2 – конус; 3 – клиновые сегменты; 4 – диск управления перемещением конуса

Рис. 2. График осевого перемещения конуса на двух шагах экспандирования: I – первое раздвигание клиновых сегментов; II – первое сдвигание клиновых сегментов; III – осевое перемещение головки экструдера; IV – второе раздвигание клиновых сегментов; V – второе сдвигание клиновых сегментов; 1 – клиновые сегменты длиной 400 мм; 2 и 3 – клиновые сегменты длиной 450 мм

Рис. 3. График радиальных перемещений клиновых сегментов на двух шагах экспандирования

Рис. 4. График изменения осевого усилия для перемещения конуса на двух шагах экспандирования:

1 – клиновые сегменты длиной 400 мм, шаг перемещения головки 300 мм; 2 – клиновые сегменты длиной 450 мм, шаг перемещения головки 350 мм; 3 – клиновые сегменты длиной 450 мм, шаг перемещения головки 300 мм

новном зависит не от длины клиновых сегментов, а от шага осевого перемещения головки экспандера: при шаге 300 мм максимальное осевое усилие составляло 29,1 Мн, а при шаге 350 мм – 30,8 МН. Как видно из рис. 3, при моделировании экспандирования с использованием клиновых сегментов длиной 450 мм наблюдались значительные колебания осевых усилий в момент начала возникно-

вления пластических деформаций в стенках трубы как на первом, так и на втором шаге.

Значительный практический интерес представляет характер изменения распределения пластической деформации стенок трубы после первого и второго шагов экспандирования при варьировании длины сегментов и шагов перемещения головки экспандера (рис. 5).

а

б

в

Рис. 5. Распределение пластической деформации по длине стенки трубной заготовки:

1 и 2 – соответственно после окончания первого и второго шага экспандирования

При длине цилиндрической части сегмента 400 мм пластическая деформация на экспандируемом участке трубной заготовки после первого шага равномерная, а после второго шага возникает участок с повышенной пластической деформацией между двумя проэкспандированными участками. Картина распределения пластической деформации значительно изменяется при увеличении длины цилиндрической части сегмента до 450 мм: уже на первом шаге формируется зона повышенной пластической деформации на границе экспандированного и неэкспандированного участков трубы (рис. 5, б и в). На втором шаге экспандирования градиент пластической деформации в этой зоне уменьшается, но формируется новая зона повышенной пластической деформации на границе экспандированного и неэкспандированного участков.

Таким образом при оптимизации геометрических параметров головки экспандера и технологии экспандирования необходимо кроме силовых факторов учитывать возможность формирования зон экстремальных пластических деформаций.

Выводы

1. Определена возможность определения методами конечно-элементного моделирования усилий, возникающих в приводах головки экспандера при калибровке сварных труб большого диаметра.

2. Показано, что при оптимизации геометрических параметров головки экспандера и технологии экспандирования необходимо кроме силовых факторов учитывать возможность формирования зон экстремальных пластических деформаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология и оборудование трубного производства : учебник для вузов / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
2. Механика сплошных сред для металлургов : учебник / В. Н. Шинкин. – М. : Изд. дом МИСИС, 2014. – 627 с.

3. Вдовин, И. В. Расчет технических параметров формоизменения трубной заготовки при различных режимах экспандирования в линии ТЭСА 1420 при производстве труб большого диаметра / И. В. Вдовин // Достижения вузовской науки. – 2013. – №. 7. – С. 215–218.

4. Цветков, И. В. Расчет усилий экспандирования труб для газонефтепроводов / И. В. Цветков // Механическое оборудование металлургических заводов. – № 2(11). – 2018. – С. 51–59.

5. Delistoian D., Chirchor M. Uoe Pipe Manufacturing Process Simulation: Equipment Designing and Construction // ACTA Universitatis Cibiniensis. – 2017. – Т. 69. – №. 1. – С. 100–112.

6. Шинкин, В. Н. Технологические расчеты процессов производства труб большого диаметра по технологии SMS Meer / В. Н. Шинкин, А. П. Коликов // Металлург. – 2011. – №. 11. – С. 77–81.

7. 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.

8. 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.

9. Костюков, В. Е. Численное моделирование производства труб большого диаметра для глубоководной прокладки / В. Е. Костюков [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2010. – №. 6.

10. Ren Q. et al. Numerical study on the X80 UOE pipe forming process //Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Т. 215. – С. 264–277.

11. Pervez T. et al. Experimental and numerical simulation of in-situ tube expansion for deep gas wells //Materials and Manufacturing Processes. – 2012. – Т. 27. – №. 7. – С. 727–732.

12. Фрункин, Д. Б. Верификация моделирования процесса экспандирования сварных прямошовных труб большого диаметра, производимых на АО «Волжский трубный завод» / Д. Б. Фрункин [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 15 (194) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016.

13. Фрункин, Д. Б. Моделирование процесса экспандирования сварных прямошовных труб большого диаметра, производимых на АО «Волжский трубный завод» / Д. Б. Фрункин [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 15 (194) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016.

14. Фрункин, Д. Б. Изменение геометрии при экспандировании сварных прямошовных труб большого диаметра, производимых на АО «Волжский трубный завод» / Д. Б. Фрункин [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 49–54.