ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 9. С. 706 – 712. © 2017. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Галимов М.Р.

УДК 621. 774.621.643

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Коликов А.П.¹, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением (apkol@mail.ru) Звонарев Д.Ю.², к.т.н., заведующий лабораторией Галимов М.Р.¹, магистр кафедры обработки металлов давлением (galimov@mail.ru)

 ¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)
 ² ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (РосНИТИ) (454139, Россия, Челябинск, ул. Новороссийская, 30)

Аннотация. В результате анализа процессов формовки листовой заготовки при различных схемах: в вальцах (схема RBE), на прессах (схема UOE) и шаговой формовки (схема JOE) показано, что в отечественной и зарубежной практике производства труб большого диаметра для прокладки морских трубопроводов применяется схема ЈОЕ. Выполнено математическое моделирование процессов пластического формоизменения листовой заготовки по схеме ЈОЕ на кромкогибочном прессе и прессе шаговой формовки и калибрования сварной О-образной трубной заготовки на механическом экспандере с использованием программного комплекса Deform 3D. Представлены результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния металла в трубных заготовках и готовых трубах по всему технологическому переделу производства труб большого диаметра. Показано, что пластическое состояние сформованных Ј-образных листовых заготовок на прессовом оборудовании и при калибровании труб характеризуется неравномерностью напряженно-деформированного состояния (НДС) металла. Приведены численные результаты распределения эквивалентных напряжений и интенсивности деформации на наружной поверхности трубы типоразмера $D \times S = 720 \times 22$ мм класса прочности К56. Показано, что участки трубы с большей неравномерностью НДС характеризуются повышенными значениями остаточных напряжений и деформаций, поэтому в этих областях отмечено увеличение диаметра и овальности трубы относительно среднего значения. Результаты проведенных экспериментальных исследований остаточных напряжений после экспандирования труб, изготовленных на ТЭСА 1020 и ТЭСА 1420 убедительно подтверждают не равномерный характер распределения НДС в поперечном сечении ТБД: в сварном шве о достигают величины +220 МПа (схема JOE) и +150 МПа (схема UOE), что составляет (0,3 – 0,4) $\sigma_{\rm r}$ тогда как в металле трубы $\sigma_{\rm oer}$ = +40...45 МПа. Численные расчеты по методу конечных элементов (МКЭ) модели значений овальности трубы после экспандирования при различных начальных геометрических размерах сформованных листовых заготовок подтверждаются данными физического измерения геометрических размеров на установке автоматического контроля. По результатам моделирования установлено, что для строительства подводного газопровода, согласно нормативной документации, требуемая геометрическая форма трубы и точность размеров внутреннего диаметра ТБД достигается при экспандировании заготовки с величиной овальности не более 5 мм. При этом обеспечивается качественная сборка и сварка кромок соединяемых труб в линии трубопровода. Приведенные результаты компьютерного моделирования по МКЭ модели напряженно-деформированного состояния пластического формоизменения заготовки-трубы при изготовлении по схеме ЈОЕ необходимо учитывать при расчете технологических параметров формовки трубной заготовки, калибровке инструмента и режимов настройки прессового оборудования.

Ключевые слова: математическое моделирование, параметры напряженно-деформированного состояния металла, формовка, листовая заготовка, калибрование труб, экспандер, сварные трубы большого диаметра.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-706-712

Системы трубопроводного транспорта, для сборки которых используются трубы большого диаметра (ТБД), относятся к опасным техногенным объектам [1]. Их аварии или отказы в работе приводят к возникновению серьезных угроз населению, инженерным сооружениям и природным массивам, поэтому к ним предъявляются высокие требования по обеспечению надежности и безопасности [1].

В отечественной [2 – 5] и зарубежной [6 – 9] практике для производства ТБД применяются различные способы формовки листовой заготовки (рис. 1):

 – формовка листовой заготовки прокаткой в трех валках с окончательной догибкой кромок на листогибочной машине (схема RBE – разработки швейцарской компании Haeusler) [4]; производство труб диаметром до 1020 мм из одного листа с формовкой заготовок по периметру на мощных прессах (схема UOE, используют на Челябинском трубопрокатном и Выксунском металлургическом заводах).

Особенность технологии производства труб по схеме JCO заключается в том, что формовка на прессах осуществляется вертикальным и последовательным перемещением инструмента при гибке кромок по всей ширине листа и пошаговой формовкой – перемещением инструмента вначале одной стороны листа, а затем другой на прессах [3, 6, 10].

Надежность и безопасность эксплуатации современных магистральных трубопроводов обеспечивается не только высокими прочностными ($\sigma_r \ge 600$ МПа) и вяз-



Рис. 1. Технологические операции при производстве прямошовных сварных труб большого диаметра по различным схемам формовки

Fig. 1. Technological operations at production of longitudinal welded large-diameter pipes under various forming schemes

костными свойствами труб большого диаметра, но и их геометрическими размерами: отклонением наружного диаметра и овальности концов труб от круглой формы, отклонением от теоретической окружности в зоне сварного шва, кривизной труб и другими [10], которые определяются напряженно-деформированным состоянием (НДС) металла в процессе изготовления (рис. 1) [9–11].

Авторы работы [4] считают, что равномерную геометрию трубной заготовки возможно получить с помощью формовки листовой заготовки в вальцах, однако у таких ТЭСА существует узкий размерный диапазон производимых труб по диаметру ($D_{\rm max} \leq 900$ мм) и толщине стенки ($S_{\rm max} \leq 25$ мм) из-за ограничения по максимально допустимому давлению в гидроцилиндрах и предельному усилию гибки. Такие же ограничения относятся и к производству труб по схеме UOE на ТЭСА1020, поэтому трубы, изготовленные по этим технологиям, применяются для строительства сухопутных трубопроводов.

Для строительства подводных трубопроводов применяются прямошовные трубы большого диаметра $(D_{\rm T} = 1220 - 1420 \text{ мм})$ со стенками толщиной до 50 мм классов прочности X90, X100 и X120, изготовленные по схеме JCO и отвечающие международным стандартам ISO 3183 и стандарту 5L Американского нефтяного института [3, 6]. Технологии их производства получили наибольшее распространение в Германии, Китае, Индии, а также используются российскими заводами: ОАО «Выксунский металлургический завод», ЗАО «Ижорский трубный завод», ОАО «Челябинский трубопрокатный завод».

Оценка неравномерности НДС металла при пластическом формоизменении листовой заготовки по схеме JCO в готовую трубу на всех стадиях технологического передела: при формовке, сварке и калибровании (рис. 1) проведена авторами с использованием моделирования методом конечных элементов (МКЭ), который получил большое распространение в процессах обработки металлов давлением [12 – 15].

На первом этапе осуществлен анализ напряженно-деформируемого состояния формуемых кромок на кромкогибочном прессе с помощью программного продукта DEFORM-3D. Модель включала 35 800 элементов конечно-элементной сетки, время расчета операции подгибки кромок составило 3 ч. [10]. Анализ полученных результатов показал неравномерный характер распределения эквивалентных (остаточных) напряжений по ширине кромки (рис. 2), величина которых составила $0,70 - 0,75\sigma_{\rm r}$. При этом на трубах с толщиной стенки до 12 мм выявлен максимальный прогиб опор нижнего инструмента, который составил 1,5 мм.

По результатам анализа эпюр эквивалентных (остаточных) напряжений установлено, что не сформованная половина листа по всей длине заготовки изгибается больше (деформация металла происходит в упругой области), чем сформованная (деформация металла происходит в упругопластической области) и разница возрастает с каждым последующим шагом на прессе шаговой формовки.

На втором этапе исследований проведено компьютерное моделирование напряженно-деформируемого состояния металла в 21 точке по периметру листовой заготовки при формовании правой части Ј-образного профиля на прессе шаговой формовки (ПШФ) для получения трубы типоразмера $D_{\rm T} \times S_{\rm T} = 720 \times 22$ мм из стали класса прочности K52 (рис. 3).

По результатам расчета эквивалентных (остаточных) напряжений и накопленной степени деформации при формовании правой части Ј-образного профиля на прессе шаговой формовки (рис. 3, б, в) сделан вывод о



Рис. 2. Характер распределения напряжений на поверхности листа после первого шага гибки на прессе шаговой формовки (*a*) и прогиб кромки листовой заготовки (*б*)





Рис. 3. Схемы расчетных точек (*a*) и распределение напряжений (б) и деформаций (в) на наружной поверхности трубной заготовки при формовании правой части Ј-образного профиля на прессе шаговой формовки

Fig. 3. Schemes of setting out points (a) and distribution of stresses (δ) and strains (b) on the outer surface of the pipe billet when forming the right side of the J-shaped profile at the JCO-press

неравномерности распределения НДС на первом, втором и третьем шагах ПШФ. В этих сечениях происходит прогиб листовой заготовки (величина деформации минимальна $\varepsilon_{min} = 0,30...0,05$), что приводит к не плотному прилеганию ее краевых участков и последующей некачественной сварке технологического шва. Известно [10], что при шаговой формовке – переходе с предыдущего шага на последующий в металле под действием остаточных напряжений происходит пружинение заготовки. Это приводит к изменению геометрических размеров первоначального (заданного) J-образного профиля трубной заготовки, который сохраняется после доформовки в сборочно-сварочном стане в круглый О-образный профиль и сварки наружным и внутренним швом (рис. 4).

Для обеспечения требований стандартов по геометрическим размерам ТБД выполняют операцию калибрования – экспандирования на механическом экспандере, которая производится в несколько шагов с перекрытием предыдущего шага (рис. 5)

Перед началом операции экспандирования внешние элементы головки экспандера смазываются эмульсией (вода + масло) для уменьшения трения между головкой и внутренней стенкой трубы (рис. 5, a), а внутренняя поверхность трубы очищается струями воды. Затем



Рис. 4. Эскиз трубной заготовки, полученной с использованием МКЭ для калибрования на экспандере

Fig. 4. Draft of pipe billet obtained using FEM for calibration on the expander



Рис. 5. Общий вид калибровки ТБД в экспандере: *a* – подготовка трубы к операции; *б* – операция экспанирования; *в* – установка сварного шва; *1* – передний конец трубы; *2* – головка экспандера

Fig. 5. General view of the calibration of LDP on the expander: a – pipe preparation for the operation, δ – expansion, s – welded join setting; 1 – forward end of pipe, 2 – head of expander

внутрь трубы вводится головка экспандера, которая состоит из 12 внешних стальных элементов и 12 внутренних клиньев. При введении клиньев внутрь внешних сегментов последние расширяются (движутся в радиальном направлении) и соприкасаются с внутренней поверхностью трубы – происходит увеличение ее диаметра (рис. 5, δ). После завершения операции экспандирования происходит распружинивание стенки трубы (труба несколько уменьшается в диаметре).

При моделировании МКЭ в DEFORM [16] производилось построение очага деформации половины заготовки (рис. 6, *a*) совместно с плоскостью симметрии и узлами конечно-элементной сетки, состоящей из 15 000 отдельных элементов, каждый из которых содержал соответственно пять элементов (рис. 6, δ).

По результатам МКЭ моделирования получены картины распределения эквивалентных напряжений

(рис. 7, *a*) и интенсивности деформации (рис. 7, *б*) на наружной поверхности трубы при экспандировании трубы типоразмера $D_{\rm T} \times S_{\rm T} = 720 \times 22$ мм класса прочности К56 на длине 6000 мм. Также фиксировались диаметр, овальность и кривизна трубной заготовки в поперечном сечении на шаге 400 мм.

В результате расчета по МКЭ модели установлено, что на наружной поверхности ТБД наблюдаются области с повышенными значениями остаточных напряжений и деформаций и поэтому в этих областях отмечено увеличение диаметра и овальности трубы относительно среднего значения (табл. 1). Величина овальности трубы рассчитывалась как разница между взаимно перпендикулярными отрезками. В табл. 1 представлены результаты вычисленных значений овальности трубы после экспандирования при различных начальных условиях.



Рис. 6. Схема построения очага деформации (*a*) при экспандировании трубы и размеры отдельного элемента сетки, прилегающие к плоскости симметрии (*б*): *I* – заготовка; *2* – стальные клинья лопасти экспандера

Fig. 6. Structure of the deformation zone (a) during the expansion of the pipe and the size of the individual mesh element adjacent to the plane of symmetry (δ):

1 - billet, 2 - steel wedges of the expander blades



Рис. 7. Картины распределения интенсивности напряжений (*a*) и деформации (*б*) в поперечных сечениях на наружной поверхности при экспандировании трубы

Fig. 7. Pattern of intensity distribution of stresses (a) and strains (δ) in the cross sections on the outer surface during the pipe expansion

По результатам моделирования установлено, что для ТБД отклонение от теоретической окружности трубы не должно превышать 2 мм [17], которое достигается в результате экспандирования заготовки с величиной овальности 5 мм. Такой характер распределения диаметра и овальности по длине трубы подтверждается и результатами физического измерения геометрических размеров на установке автоматического контроля [16]. Известны зарубежные разработки специальных установок [8] для правки и калибровки концов стальных труб, что обеспечивает качественную сборку и сварку кромок соединяемых труб в линии трубопровода.

Особенность процесса калибрования ТБД заключается в том, что сварной шов располагается в вертикальной плоскости так, что он не должен подвергаться деформации, как показано на рис. 1, *в*. Таким образом, в сварном шве сохраняются остаточные растягивающие напряжения, полученные при сварке. На остальных участках трубы растягивающие напряжения $+\sigma_{ocr}$ в результате экспандирования увеличиваются, однако после завершения операции калибрования величина $+\sigma_{ocr}$ только умнышается (табл. 2).

Из труб большого диаметра, изготовленных по схемам прессовой формовки UOE и JOE и прошедших экспандирование-калибрование, были взяты образцы,

Таблица 1

Результаты вычисления овальности и диаметра трубы после экспандирования трубной заготовки

Table 1. Calculation results of the out-of-roundness	s and
diameter of pipe after expansion of pipe billet	

Овальность	Овальность трубы	Диаметр трубы
трубной	после экспанди-	после экспанди-
заготовки, мм	рования, мм	рования, мм
15	8	1154,2
10	5	1153,6
5	2	1153,5
0	0	1152,7

на которых проведены замеры остаточных напряжений (табл. 2) по методике, описанной в работе [18].

Однако при длительной эксплуатации трубопроводов возможно разрушение даже при напряжениях, не превышающих максимально допустимые в результате действия всех нагрузок на поверхность труб, среди которых автор работы [2] выделяет сварочные и остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления труб.

Выводы. В результате компьютерного моделирования определен интервал овальностей трубной заготовки перед операцией экспандирования ТБД. Аналогичные результаты моделирования процесса экспандирования труб могут быть использованы для регламентирования геометрических параметров трубной заготовки по всей технологической цепочке производства сварных труб большого диаметра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
- Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
- **3.** Осадчий В.Я., Коликов А.П. Производство и качество стальных труб. М.: МГУПИ, 2012. 370 с.

Таблица 2

Экспериментальные значения остаточных напряжений в фрагменте труб большого диаметра класса прочности К60

Table 2. Experimental values of residual stresses in the segment of large diameter pipes of K60 strength class

Расстояние до сварного	Типоразмер труб $D_{_{\rm T}} \times S_{_{\rm T}}$, мм			
	1420×12		1020×26	
шва	σ _{ост} , МПа	$\sigma_{_{oct}}/\sigma_{_{T}}$	σ _{ост} , МПа	$\sigma_{_{oct}}/\sigma_{_{T}}$
Центр сварного шва	+220	~ 0,5	+150	~ 0,3
Т. 2 на расстоянии 24 мм	+40	0,09	+45	0,1

- Урядов Р.В., Христофоров А.С. Применение трехвалковой листогибочной машины и установок роликов догибки кромок для производства прямошовных сварных труб большого диаметра с соотношением диаметр/толщина стенки менее 30: Сб. тр. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. С. 414 422.
- Zvonarev D.Yu., Osadchii V.Ya., Romantsov A.I., Kolikov A.P. Shaping of Sheet to Produce Large-Diameter Welded Pipe // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 6. P. 443 – 446.
- 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 «Рос-НИТИ», 2005. С. 105 – 108.
- Wen S.W., Hilton P., Farrugia D.C.J. Finite element modeling of a submerged arc welding process // Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 119. P. 203 – 209.
- Kishiguchi T., Hosoda H., Ikuno Y. Pipe end round equipment and control system (PERFECTS) // Chin-Niittetsu-Sumikin Engineering Gino. 2013. No. 4. P. 39 – 45.
- 9. Katsumi M., Kenji O. Steel Products for Energy Industries // JFE Technical Report. 2013. Vol. 43. No. 18. P. 1 11.
- 10. 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: ЮУрГУ, 2015. – 166 с.
- Галкин В.В., Чебурков А.С., Пачурин Г.В. Оценка напряженнодеформированного состояния металла трубных заготовок, изготовленных пошаговой формовкой, методом математического моделирования // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 114 – 115.

- 12. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М. и др. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. С. 615 – 621.
- Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В. Е. Селезнева. – М.: МАКС-Пресс, 2009. – 436 с.
- 14. 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.
- 15. Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. МКЭ-моделирование процесса толстолистовой прокатки. Анализ неоднородности напряженно-деформированного состояния в очаге деформации: Сб. тр. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. С. 185 – 189.
- 16. Звонарев Д.Ю. ZV JCO: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660023; заявл. 27.08.2013; опубл. 20.12.2013.
- Коликов А.П., Звонарев Д.Ю. Моделирование процесса экспандирования сварных труб большого диаметра. Сталь, 2017. № 3. С. 41 – 43.
- Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D.V. etc. Stress in welded pipe // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 11. P. 808 – 812.

Поступила 19 января 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 9, pp. 706–712.

EVALUATION OF STRESS-STRAIN STATE OF THE METAL ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING IN PRODUCTION OF LARGE DIAMETER PIPES

A.A. Kolikov¹, D.Yu. Zvonarev², M.R. Galimov¹

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

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

Abstract. The analysis of slab forming processes under different schemes: in rolls (RBE scheme), presses (UOE scheme) and stepwise forming (JCOE scheme) shows that domestic and foreign plants of large-diameter pipe production for laying offshore pipelines use JCOE scheme. The mathematical modeling of processes of plastic deformation of slab in edge-bending press by JCOE scheme and on the stepwise forming and calibration press of welded O-shaped pipe billet on a mechanical expander was made using the Deform 3D software. The results of mathematical modeling of stress-strain state of the metal in pipe billets and finished pipes are considered for all the technological production process of large diameter pipes. It is shown that the plastic state of the molded J-shaped slabs on forging equipment and at pipe calibration is characterized by uneven stress-strain state (SSS) of the metal. Numerical results of the distribution of equivalent stress and strain rate on the outer surface of the pipe of the size $D_t \times S_m = 720 \times 22$ mm of K56 strength class have shown that pipe sections with more uneven SSS have high values of residual stresses and strains, so in these areas was noted an increase of diameter and roundness of the pipe relative to the average. The results of experimental research of residual stresses in pipes after expanding made at TESA 1020 and TESA 1420 confirm the unstable distribution of stress-strain state in the cross-section of large diameter pipes. In the weld joint ores reaches a value of +220 MPa (JOE scheme) and +150 MPa (UOE scheme), which is $(0.3 - 0.4)\sigma_t$, whereas in the pipe metal $\sigma_{res} = +40...45$ MPa. Numerical calculations by the FEM model of out-of-roundness of pipe after expansion at various initial geometrical dimensions of the molded slabs are confirmed by physical measurements of geometric dimensions on the installation of automatic control. The modeling results have established that for the construction of underwater gas pipeline according to normative documents the optimal geometric pipe shape and dimensional accuracy of the inner diameter of large-diameter pipes can be achieved at expanding of the pipe billet with out-of-roundness of 5 mm. This ensures the quality assembly and welding of the edges of connected pipes in the pipeline. The results of computer simulation by the FEM model of the stress-strain state of the plastic forming of pipe billet at manufacture by JCOE scheme should be considered in the calculation of technological parameters of pipe billet molding, tool calibration and press equipment setting modes.

- *Keywords*: mathematical modeling, parameters of stress-strained metal, forming, slab, pipe calibration, expander, large diameter welded pipe.
- **DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-9-706-712

REFERENCES

- Mazur I.I., Ivantsov O.M. *Bezopasnost' truboprovodnykh system* [Safety of pipeline systems]. Moscow: ITs ELIMA, 2004, 1104 p. (In Russ.).
- Efron L.I. Metallovedenie v "bol'shoi" metallurgii. Trubnye stali [Metallography in large metallurgy. Pipe steels]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.).
- **3.** Osadchii V.Ya., Kolikov A.P. *Proizvodstvo i kachestvo stal'nykh trub* [Production and quality of steel pipes]. Moscow: MGUPI, 2012, 370 p. (In Russ.).
- 4. Uryadov R.V., Khristoforov A.S. The use of three-roll plate bending machine and rolls units for edges finish bending at the production of

longitudinal welded large diameter pipes with a ratio of diameter/ wall thickness less than 30. In: *Sb. trudov: Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii* [Innovative technologies in metallurgy and engineering: Coll. of papers]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2014, pp. 414–422. (In Russ.).

- 5. Zvonarev D.Yu., Osadchii V.Ya., Romantsov A.I., Kolikov A.P. Shaping of sheet to produce large-diameter welded pipe. *Steel in Translation.* 2016, vol. 46, no. 6, pp. 443–446.
- 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 "Ros-NITI", 2005, pp. 105–108. (In Russ.).
- Wen S.W., Hilton P., Farrugia D.C.J. Finite element modeling of a submerged arc welding process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, vol. 119, pp. 203–209.
- 8. Kishiguchi T., Hosoda H., Ikuno Y. Pipe end round equipment and control system (PERFECTS). *Chin-Niittetsu-Sumikin Engineering Gino*. 2013, no. 4, pp. 39–45.
- 9. Katsumi M., Kenji O. Steel products for energy industries. *JFE Technical Report*. 2013, vol. 43, no. 18, pp. 1–11.
- 10. 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 edge-banding and step molding of welded pipes of large diameter to ensure high accuracy of dimensions and shapes. Cand. Tech. Sci. Diss.]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2015, 166 p. (In Russ.).
- Galkin V.V., Cheburkov A.C., Pachurin G.V. Evaluation by mathematical modeling of stress-strain of metal billets made by stepwise molding method. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, no. 2, pp. 114–115. (In Russ.).
- 12. Kolikov A.P., Zvonarev D.Yu., Taupek I.M. Kadil'nikov S.V., Galimov M.R. Mathematical model of plastic forming of the slab for

large diameter welded pipes. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 615–621. (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: MAKS Press, 2009, 436 p. (In Russ.).
- Danchenko V.N., Milenin A.A., Kuz'menko V.I., Grinkevich V.A. Komp'yuternoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem. Chislennye metody [Computer simulation of processes of metal forming. Numerical methods]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2005, 448 p. (In Russ.).
- 15. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., P'yankov K.P. FEM-simulation of plate rolling. Analysis of heterogeneity of the stress-strain state in the deformation zone. In: *Sb. trudov: Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii* [Innovative technologies in metallurgy and engineering: Coll. of papers]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2014, pp. 185–189. (In Russ.).
- **16.** *ZV JCO*. Certificate of state registration of computer program no. 2013660023, publ. 20.12.2013. (In Russ.)
- Kolikov A.P., Zvonarev D.Yu. Simulation of expansion process of welded large-diameter pipes. *Stal*[']. 2017, no. 3, pp. 41–43. (In Russ.).
- Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D. V., Kulyutin S.A, Kadil'nikov S.V. Stress in welded pipe. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 11, pp. 808–812.

Information about the authors:

A.A. Kolikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming" (apkolikov@mail.ru)
D.Yu. Zvonarev, Cand. Sci. (Eng), Head of the Laboratory
M.R. Galimov, MA Student of the Chair "Metal Forming" (galimov-m@mail.ru)

Received January 19, 2017