

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением Metal forming. Technology and equipment of metal forming

Научная статья
УДК 621.774.21
DOI: 10.14529/met250103

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ПЕРЕДЕЛА ЛИСТ-ТРУБА С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ ВАЛКОВОГО ИНСТРУМЕНТА И СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Я.Е. Залавин, Yakov.zalavin@tmk-group.com
Г.С. Баталов, german.batalov@tmk-group.com, <https://orcid.org/0000-0001-9926-2913>
М.С. Машенцева, mashentseva@tmk-group.com, <http://orcid.org/0000-0001-7856-3266>
ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию формообразующих операций, применяемых в производстве труб большого диаметра (ТБД) с использованием трехвалковой листогибочной машины (вальцев). В программном комплексе Marc.Mentat разработаны конечно-элементные модели процессов вальцевой формовки, догибки кромок, сборки, сварки и экспандирования трубы. Объектом исследования является труба диаметром 1420 мм с толщиной стенки 21,6 мм и длиной 12 м из стали группы прочности X70. В модели трубы использовались тонкостенные (Shell) элементы, что позволяло относительно быстро осуществлять процесс моделирования без существенной потери точности расчетов. Проведено комплексное конечно-элементное моделирование формообразующих операций передела лист-труба с учетом деформации верхнего вала листогибочной машины и сварочных деформаций. Установлено, что при каждой технологической операции в трубе возникает неоднородное напряженно-деформированное состояние (НДС), которое оказывает влияние на конечную геометрию труб. Показано, что наибольшую неоднородность НДС в трубу вносят вальцевая формовка и догибка кромок. Разработанная комплексная конечно-элементная модель может быть использована исследователями и технологами для расчета настроек технологического оборудования и энергосиловых параметров формообразующих операций.

Ключевые слова: формообразующие операции, трубы большого диаметра, вальцевая формовка, догибка кромок, сборка, сварка, экспандирование, компьютерное моделирование

Для цитирования: Залавин Я.Е., Баталов Г.С., Машенцева М.С. Конечно-элементное моделирование формообразующих операций передела лист-труба с учетом деформации валкового инструмента и сварочных деформаций // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 1. С. 28–36. DOI: 10.14529/met250103

FINITE ELEMENT MODELING OF THE FORMING OPERATIONS OF THE PLATE-PIPE CONVERSION, TAKING INTO ACCOUNT THE DEFORMATION OF THE ROLLING TOOL AND WELDING DEFORMATIONS

Ya.E. Zalavin, Yakov.zalavin@tmk-group.com

G.S. Batalov, german.batalov@tmk-group.com, <https://orcid.org/0000-0001-9926-2913>

M.S. Mashentseva, mashentseva@tmk-group.com, <http://orcid.org/0000-0001-7856-3266>

TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The work is devoted to the study of forming operations used in the production of large diameter pipes (LDPE) using a three-roll bending machine (rollers). The Marc.Mentat software package has developed finite element models of the processes of roller forming, edge bending, assembly, welding and pipe expansion. The object of the study is a pipe with a diameter of 1420 mm with a wall thickness of 21.6 mm and a length of 12 m made of steel of strength group X70. Thin-walled (Shell) elements were used in the pipe model, which made it possible to carry out the modeling process relatively quickly without significant loss of calculation accuracy. A comprehensive finite element modeling of the forming operations of the sheet-pipe conversion has been carried out, taking into account the deformation of the upper roll of the bending machine and welding deformations. It is established that at each technological operation, an inhomogeneous stress-strain state (VAT) occurs in the pipe, which affects the final geometry of the pipes. It is shown that the greatest heterogeneity of VAT in the pipe is introduced by roll forming and edge bending. The developed complex finite element model can be used by researchers and technologists to calculate the settings of technological equipment and energy-strength parameters of forming operations.

Keywords: forming operations, large-diameter pipes, roller forming, edge bending, assembling, welding, expansion, computer modeling

For citation: Zalavin Ya.E., Batalov G.S., Mashentseva M.S. Finite element modeling of the forming operations of the plate-pipe conversion, taking into account the deformation of the rolling tool and welding deformations. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(1):28–36. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250103

Магистральные трубопроводные системы играют ключевую роль в современной инфраструктуре, обеспечивая транспортировку углеводородов на большие расстояния. Одним из критически важных факторов, обеспечивающих эксплуатационную надежность трубопроводов, является высокая точность геометрических параметров труб.

Совершенствование технологии производства труб большого диаметра для транспортировки нефти и газа становится всё более актуальным в условиях современных вызовов, связанных с безопасностью, экологичностью и операционной эффективностью данных процессов [1, 2].

Формовку основного периметра труб большого диаметра осуществляют на прессах либо в вальцах [3–5].

В технологических линиях производства ТБД с применением вальцевой формовки для получения трубной заготовки под сварку лист

вначале изгибают в трехвалковых вальцах до заданного радиуса, затем выполняют догибку плоских участков в клетки догибки кромок, после чего выполняется сборка трубы и сварка технологического шва, затем производят сварку основных швов и пошаговое экспандирование.

На сегодняшний день для совершенствования технологии производства труб большого диаметра и освоения новых видов трубной продукции успешно применяются средства конечно-элементного моделирования [6–14].

По данным литературных источников, как правило, исследуется один или несколько формообразующих процессов.

При моделировании технологических процессов методом конечных элементов принимают следующие допущения: геометрические и механические свойства заготовки изотропны; деформирующий инструмент абсолютно жесткий; сварочные деформации не учиты-

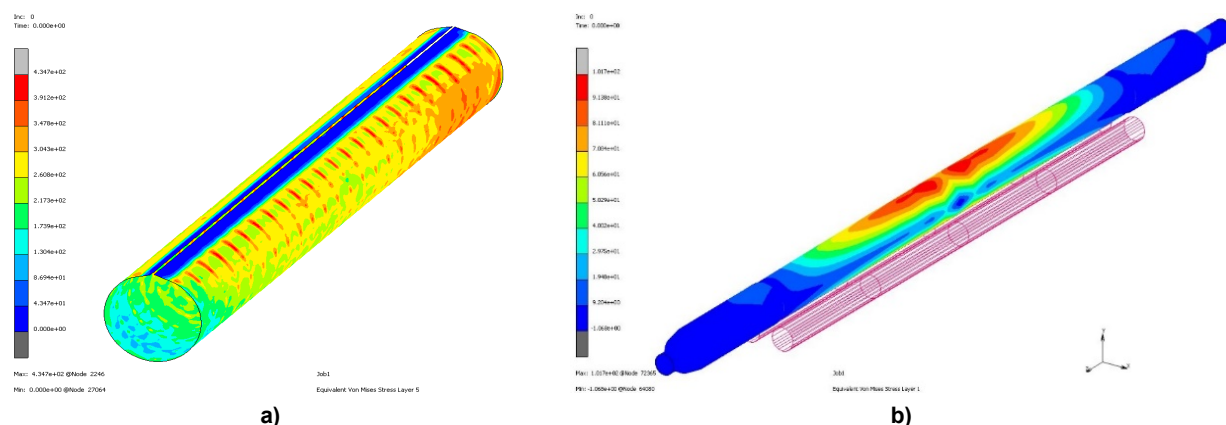


Рис. 1. Результаты моделирования процесса вальцевой формовки: а – общий вид расчётной модели после моделирования процесса формовки; б – распределение эквивалентных напряжений по телу верхнего вала
Fig. 1. Simulation results of the roller forming: a – general view of the computational model after modeling the molding process; b – distribution of equivalent stresses over the upper roll body

ваются; история напряженно-деформированного состояния заготовки, полученная в результате выполнения предшествующих операций, не учитывается.

В рамках данного исследования разработана комплексная конечно-элементная модель передела лист-труба с применением вальцевой формовки с учетом деформации верхнего вала машины вальцевой формовки, сварочных деформаций и учета истории накопления напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки от операции к операции. Материал исходной заготовки изотропный.

Моделирование деформационных операций передела лист-труба и сварки проводили в специализированном программном комплексе MSC.Marc Mentat. Моделирование проводилось для трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 21,6 мм и длиной 12 м из стали группы прочности X70.

При моделировании технологических операций применяли тонкостенные (Shell 140) оболочечные элементы.

Вальцевая формовка

Моделирование процесса вальцевой формовки трубной заготовки осуществлялось в три прохода верхним валком диаметром 900 мм при расстоянии между нижними валками 600 мм с начальной шириной листа 4353 мм и толщиной 21,6 мм. При этом верхний валок задавался как упругое деформируемое тело, нижние валки задавались как жесткие тела.

На рис. 1а представлено распределение эквивалентных напряжений по объему трубной

заготовки после вальцевой формовки. Видно, что трубная заготовка имеет весьма большую неоднородность остаточных напряжений.

Учет деформации верхнего вала (рис. 1б) в конечно-элементной модели позволяет оценить влияние остаточных напряжений, возникающих в трубной заготовке после формовки, на результат дальнейших операций, а также производить подбор усилия противоизгиба для получения требуемой формы межкромочного зазора после формовки.

Догибка кромок

В отличие от прессовой технологии получения трубной заготовки под сварку, при вальцевой технологии кромку подгибают после формовки основного периметра заготовки. Догибку кромок осуществляют в двухвалковой клети с профилированными валками (рис. 2а) в несколько проходов.

Неравномерность высоты подгибки кромок может быть связана как с краевым эффектом, так и с потерей устойчивости кромки вследствие ее удлинения. Последний негативный эффект может быть минимизирован путем правильного распределения деформации между проходами.

Моделирование догибки кромок производили в три прохода [15] с нижним приводным и верхним холостым валками.

Результаты моделирования догибки кромок, представленные на рис. 2б в виде поля напряжений показывают, что в процессе догибки возникают достаточно большие продольные деформации кромки, что соответствует литературным данным [16, 17].

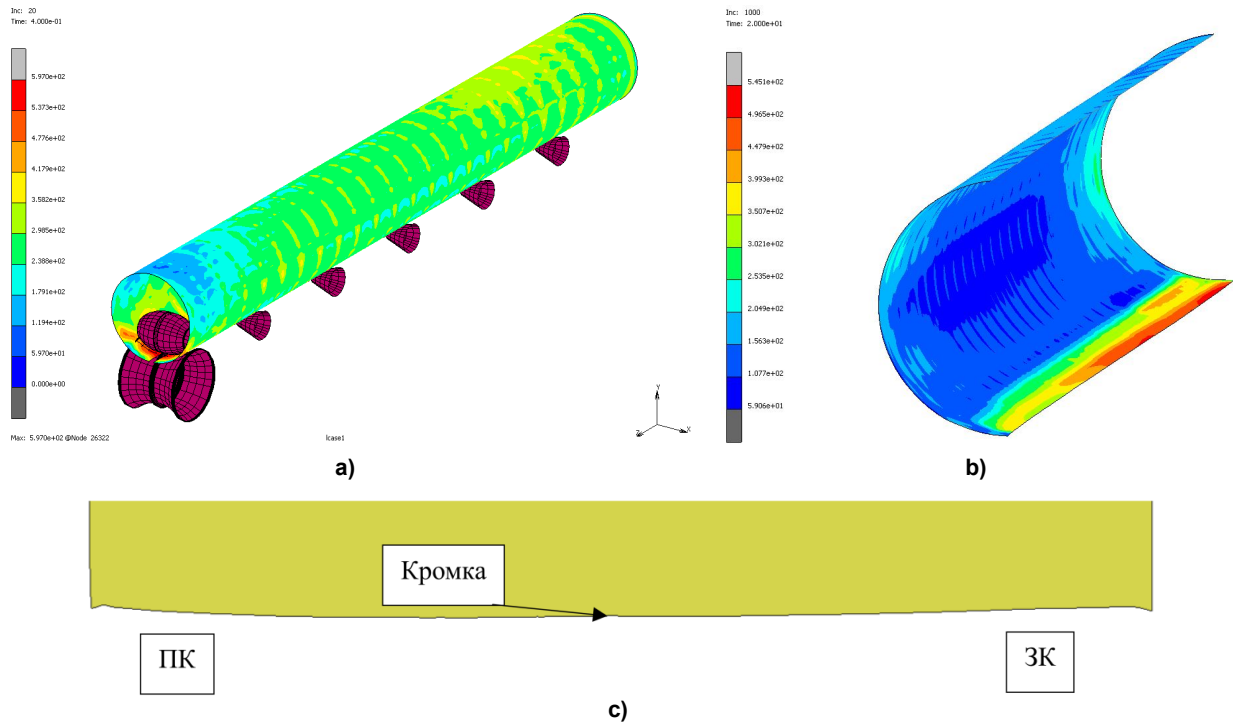


Рис. 2. Результаты моделирования процесса догибки кромок: а – распределение остаточных пластических деформаций в прикромочной зоне после догибки; б – форма кромки после догибки в 1-м проходе; с – форма кромки после догибки во 2-м проходе

Fig. 2. Simulation results of the edge bending: а – distribution of residual plastic deformations in the edge zone after bending; б – the shape of the edge after bending in the 1st pass; с – the shape of the edge after bending in the 2nd pass

Также стоит отметить неравномерную высоту подгибки кромок по длине трубы (рис. 2с). Для наглядности масштаб деформированной кромки был увеличен в 4 раза. Из рис. 2с видно, что на переднем конце трубы за счет большей высоты подгибки кромок вертикальный диаметр будет меньше, чем на заднем конце.

Сборка

Сборку трубной заготовки моделировали с учетом накопленного НДС после предыдущих технологических операций. При моделировании тепловым воздействием от технологического шва пренебрегали, так как его влияние на НДС трубы незначительно.

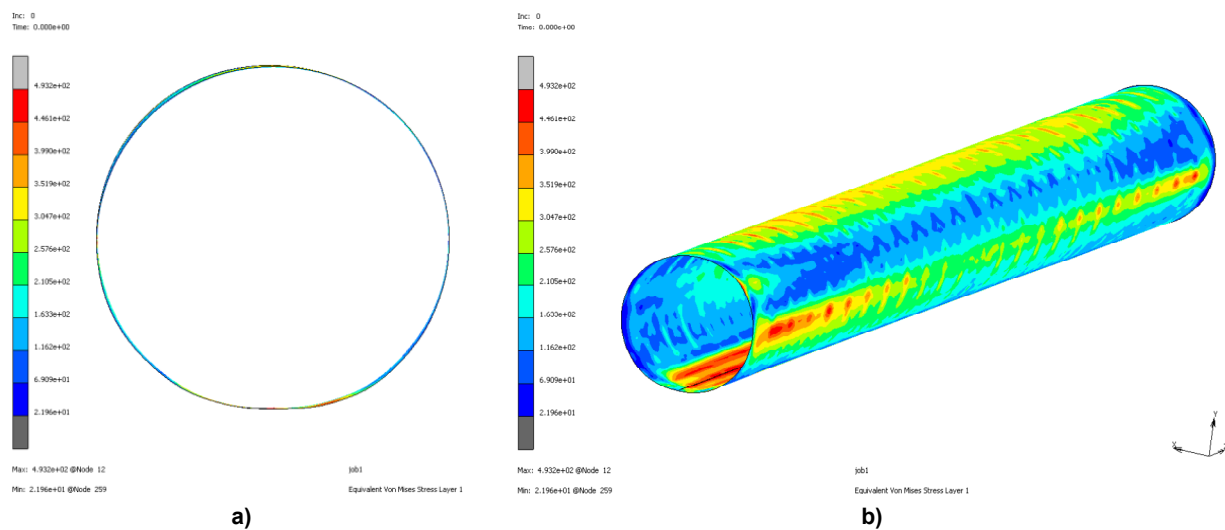


Рис. 3. Результаты моделирования процесса сборки: а – форма поперечного сечения сваренной трубы; б – распределение эквивалентных остаточных напряжений по телу трубы

Fig. 3. Simulation results of the assembling: а – the shape of the cross-section of the welded pipe; б – distribution of equivalent residual stresses over the pipe body

Роликовые балки располагали под углом 90, 30, и 0° относительно вертикали.

На рис. 3а представлен профиль трубы после сборки, а на рис. 3б – распределение напряжений.

Проведенное моделирование показывает, что напряженно-деформированное состояние трубы после сборки неоднородно. В области действия валков догибки кромок в трубе сохраняется область повышенных остаточных напряжений.

Сварка

Процесс сварки трубной заготовки моделировали с учетом накопленного НДС после предыдущих технологических операций. Процесс сварки моделировали с учетом локального нагрева трубы до 1500 °С движущимся ис-

точником тепла [18]. На рис. 4 представлено НДС трубы после сварки.

В процессе сварки происходило увеличение вертикального и уменьшение горизонтального диаметров, что соответствует наблюдаемым искажениям поперечного сечения трубы под действием термоцикла сварки [19, 20].

Экспандирование

Моделирование процесса экспандирования осуществляли с учетом НДС от предыдущих формообразующих операций. Коэффициент экспандирования составлял 1,2%. Экспандерная головка, состоящая из 12 сегментов, перемещалась от заднего конца к переднему с перекрытием шагов 50 мм.

На рис. 5 представлено распределение остаточных эквивалентных напряжений в трубе

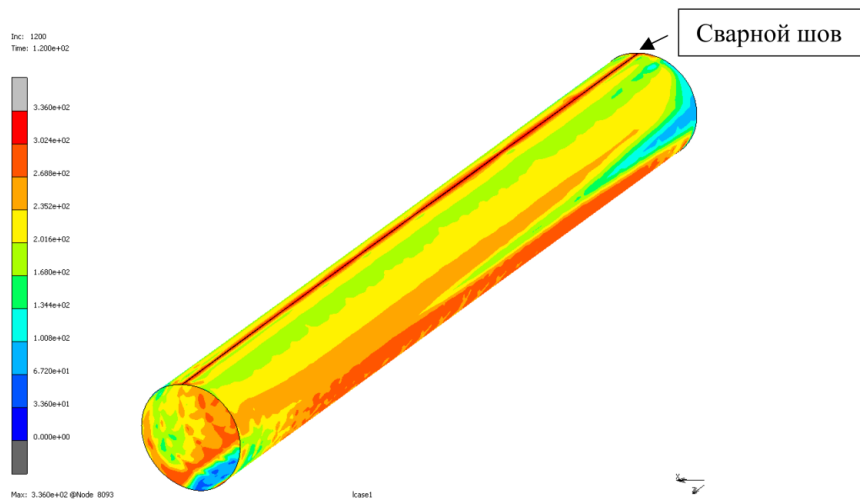


Рис. 4. Общий вид расчетной модели после моделирования процесса сварки
Fig. 4. General view of the calculation model after modeling the welding process

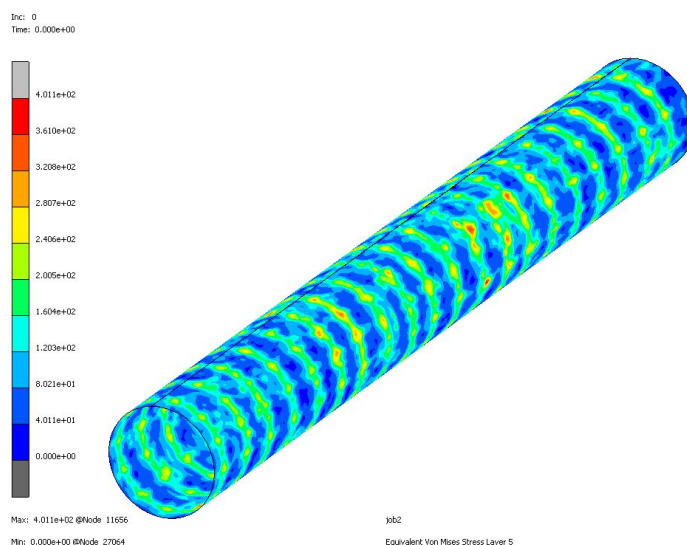


Рис. 5. Результат моделирования процесса экспандирования
Fig. 5. The result of modeling the expansion process

Результаты измерений конечно-элементных моделей после экспандирования
Measurement results of finite element models after expansion

Геометрический параметр	Диаметр средний, мм		Овальность, мм		Общая кривизна, мм	Концевая кривизна на 1 м	
	ПК	ЗК	ПК	ЗК		ПК	ЗК
«Идеальная» труба	1421,2	1420,5	0,7	0,8	1,3	-0,8	-0,4
Труба с предысторией НДС	1422,7	1421,4	6,7	4,6	1,0	-0,9	-0,4
Отклонение, мм\%	1,5\0,1	0,9\0,1	6\89,6	3,8\82,6	0,3\23,1	0,1\11,1	0\0

после экспандирования. Как видно из рис. 5, экспандирование существенно выравнивает напряженно-деформированное состояние трубы. При этом наблюдается незначительная полосчатость НДС, которая может быть устранена настройкой экспандера.

С целью установления количественного влияния неоднородности напряженно-деформированного состояния на геометрические характеристики трубы после экспандирования проведено моделирование процесса экспандирования «идеальной» трубы.

Под «идеальной» трубой понимается труба без предыстории формоизменения, поперечное сечение которой представляет эллипс, построенный в САД-системе. Разница между большой и малой осями эллипса была равна величине овальности трубы с предысторией НДС – 15,5 мм. Поперечное сечение вытягивалось на длину 12 метром и разбивалось на тонкостенные элементы. Задание перемещений головки экспандера в варианте с идеальной трубой аналогично варианту трубы с предысторией НДС.

Геометрические параметры двух труб после экспандирования приведены в таблице.

Выводы

1. Проведено комплексное конечно-элементное моделирование формообразующих операций передела лист-труба, учитывающее наследование напряженно-деформированного состояния трубы от операции к операции.

2. Средняя величина овальности труб, произведенных по технологии RB-forming, составляет 7–8 мм. Моделирование отдельной операции экспандирования без накопленной деформации не дает точной оценки изменения геометрических параметров. Поэтому для более точного прогнозирования необходимо учитывать НДС за предыдущие переделы в объемной постановке.

3. Разработанная конечно-элементная модель может быть применена для расчета настроек вальцовочной машины, установки догибки кромок, сборочно-сварочной машины и экспандера.

Список литературы

1. Ильичев В.Г. Эффективность современных технологий производства и качество труб большого диаметра // Черные металлы. 2019. № 9. С. 17–24.
2. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю. Применение моделирования для исследования качества сварных труб по геометрическим размерам // Черные металлы. 2021. № 4. С. 9–13.
3. Ильичев В.Г., Залавин Я.Е. Технологические особенности и резервы улучшения геометрических характеристик при вальцевой формовке заготовки для труб большого диаметра // Сталь. 2016. № 1. С. 32–35.
4. Ильичев В.Г. Технологические особенности процесса формовки прямошовных труб для нефтегазопроводов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2009. № 5. С. 60–62.
5. Баталов Г.С., Радионова Л.В., Лунев А.А. Математическое моделирование процесса формовки труб большого диаметра. Исследование смещения листа в процессе шаговой формовки // Трубы – 2018. Трубная промышленность сегодня и завтра: труды XXIII Международной научно-практической конференции, 17–19 сентября 2018 года, г. Челябинск. Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2018. Ч. II. С. 79–81.
6. Залавин Я.Е., Ильичев В.Г. Расчет формоизменения трубной заготовки в процессе сборки // Трубы – 2018. Трубная промышленность сегодня и завтра: труды XXIII Международной научно-

практической конференции, 17–19 сентября 2018 года, г. Челябинск. Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2018. Ч. II. С. 42–44.

7. Залавин, Я.Е. Расчет параметров вальцевой формовки с целью минимизации неравномерности деформации заготовки в поперечном сечении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 4. С. 23–29. DOI: 10.14529/met200403

8. 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. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00945-1

9. 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.

10. Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. МКЭ-моделирование процесса толстолистовой прокатки. Анализ неоднородности напряженно-деформированного состояния в очаге деформации // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы международного молодеж. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. С. 185–189.

11. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю. Моделирование процесса экспандирования сварных труб большого диаметра // Сталь. 2017. № 3. С. 41–43.

12. Sun B.-F., Jin Y.-H. Simulation analysis of shaping process of high frequency longitudinal electric resistance welded pipe // Journal of China University of Petroleum. 2010. Vol. 34, no. 4. P. 123–126. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.04.024

13. Thermally and mechanical coupled simulation of metal forming processes / S. Stepunov, N. Biba, A. Maximov, A. Vlasov // Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity. Aachen, Germany: Publ. ICTP 2011, 2011. P. 171–175.

14. Ефремов Д.Б., Нгуен З.К. Конечно-элементное моделирование процесса экспандирования труб большого диаметра с начальным дефектом формы в виде круглого выступа // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 3. С. 41–48.

15. 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.

16. Ильичев В.Г., Пермьяков И.Л., Кардаев Н.Е. Кинематические и силовые параметры процесса догибки прикромочных участков трубной заготовки в условиях УСПТ ОАО «ВТЗ» // Трубы – 2014. Трубная промышленность России. Вектор инноваций: труды Международной научно-практической конференции, 15–18 сентября 2014 года, г. Челябинск. Челябинск: ОАО «РосНИТИ». 2014. Т. 2. С. 216–219.

17. Abeyrathna B., Rolfe B., Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 743–754. DOI: 10.1007/s00170-017-0164-x

18. Залавин Я.Е., Титаренко П.П., Пешеховский С.В. Влияние термоцикла сварки на изменение сечения прямошовных труб большого диаметра // Сталь. 2023. № 1. С. 22–28.

19. Исследование остаточных напряжений в сварных трубах / А.П. Коликов, А.С. Лелётко, Д.Б. Матвеев и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57, № 11. С. 48–53.

20. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes / Z.-W. Han, C. Liu, W.-P. Lu et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 145, no. 3. P. 311–316. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.07.010

References

1. Ilyichev V.G. Efficiency of modern production technologies and quality of large diameter pipes. *Chernye metally*. 2019;(9):17–24. (In Russ.)

2. Kolikov A.P., Zvonarev D.Yu. Application of modeling to study the quality of welded pipes by geometric dimensions. *Chernye metally*. 2021;(4):9–13. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2021.04.02

3. Ilyichev V.G., Zalavin Ya.E. Improved the roller shaping of large-diameter pipe from strip. *Steel in Translation*. 2016;(1):54–57. DOI: 10.3103/S0967091216010058

4. Ilyichev V.G. Technological features of the forming process of straight-seam pipes for oil and gas pipelines. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2009;(5):60–62. (In Russ.)
5. Batalov G.S., Radionova L.V., Lunev A.A. Mathematical simulation of forming large diameter pipes. Research on sheet displacement during step forming. In: *Pipes – 2018. Pipe industry today and tomorrow: Proceedings of the XXIII International scientific and practical conference, September 17–19, 2018, Chelyabinsk*. Chelyabinsk: OJSC “RosNITI”; 2018. Part II. P. 79–81. (In Russ.)
6. Zalavin Ya.E., Ilyichev V.G. Calculation of pipe workpiece deformation during assembling process. In: *Pipes – 2018. Pipe industry today and tomorrow: Proceedings of the XXIII International scientific and practical conference, September 17–19, 2018, Chelyabinsk*. Chelyabinsk: OJSC “RosNITI”; 2018. Part II. P. 42–44. (In Russ.)
7. Zalavin Ya.E. Calculation of the Parameters of the Roll Forming with the Purpose of Minimizing the Uniformity of Deformation in the Cross Section. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2020;20(4):23–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200403
8. Wen S.W., Hilton P., Farrugia D.C.J. Finite element modeling of a submerged arc welding process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;119:203–209. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00945-1
9. Danchenko V.N., Milenin A.A., Kuzmenko V.I., Grinkevich V.A. *Komp'yuternoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem. Chislennyye metody* [Computer simulation of metalworking processes by pressure. Numerical methods]. Dnepropetrovsk: Sistemnyye tekhnologii; 2005. 448 p. (In Russ.)
10. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., Pyankov K.P. FEM modeling heavy plate rolling. Analysis of non-uniform stress-strain state in the deformation. In: *Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering: materials of the International youth scientific and practical conference*. Ekaterinburg: Ural University Publ.; 2014. P. 185–189. (In Russ.)
11. Kolikov A.P., Zvonarev D.Y. Expansion of large-diameter welded pipe. *Steel in Translation*. 2017;47(3):210–212. DOI: 10.3103/S0967091217030068
12. Sun B.-F., Jin Y.-H. Simulation analysis of shaping process of high frequency longitudinal electric resistance welded pipe. *Journal of China University of Petroleum*. 2010;34(4):123–126. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.04.024
13. Stepunov S., Biba N., Maximov A., Vlasov A. Thermally and mechanical coupled simulation of metal forming processes. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity*. Aachen, Germany: Publ. ICTP 2011; 2011. P. 171–175.
14. Efremov D.B., Nguyen Z.C. Finite element modeling of the expanding process of large diameter pipes with an initial defect in the form of a round protrusion. *Forging and stamping production. Material working by pressure*. 2021;(3):41–48. (In Russ.)
15. Kishiguchi T., Hosoda H., Ikuno Y. Pipe end round equipment and control system (PERFECTS). *Chin-Niittetsu-Sumikin Engineering Gino*. 2013;(4):39–45.
16. Ilichev V.G., Permyakov I.L., Kardaev N.E. Kinematic and force parameters of edge forming process at Volzhsky pipe plant. In: *Pipes – 2014. Pipe industry of Russia. Vector of innovations: Proceedings of the International scientific and practical conference, September 15–18, 2014, Chelyabinsk*. Chelyabinsk: OJSC “RosNITI”; 2014. Vol. 2. P. 216–219. (In Russ.)
17. Abeyrathna B., Rolfe B., Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92:743–754. DOI: 10.1007/s00170-017-0164-x
18. Zalavin Y.E., Titarenko P.P., Peshekhovskii S.V. Effect of Welding Thermal Cycle on the Forming in a Section of Straight-Seam Pipes with Large Diameters. *Steel in Translation*. 2023;53(1):60–67. DOI: 10.3103/S0967091223010163
19. Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D.B., Kadir'nikov S.V., Kulyutin S.A. Residual stress in welded pipe. *Steel in Translation*. 2014;44(11):808–812. DOI: 10.3103/S0967091214110096
20. Han Z.-W., Liu C., Lu W.-P., Ren L.-Q., Tong J. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;145(3):311–316. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.07.010

Информация об авторах

Залавин Яков Евгеньевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией моделирования технологических процессов, ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия; Yakov.zalavin@tmk-group.com.

Баталов Герман Сергеевич, начальник сектора технологии формовки труб, ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия; german.batalov@tmk-group.com.

Машенцева Мария Сергеевна, научный сотрудник сектора технологии формовки труб, ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия; mashentseva@rosniti.ru.

Information about the authors

Yakov E. Zalavin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Technological Process Modeling Laboratory, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; Yakov.zalavin@tmk-group.com.

German S. Batalov, Head in the Pipe Forming Sector, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; mashentseva@rosniti.ru.

Maria S. Mashentseva, Researcher in the Pipe Forming Sector, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; mashentseva@rosniti.ru.

Статья поступила в редакцию 04.01.2025

The article was submitted 04.01.2025