

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/met250304

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ЭКСПАНДИРОВАНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

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. В работе представлено исследование влияния экспандирования трубы на ее конечные геометрические параметры. Основной геометрической характеристикой является овальность готовой трубы. Проведено компьютерное моделирование при изменении коэффициента экспандирования, при различных технологиях экспандирования и при изменении коэффициента первой подачи. Также проведена оценка влияния последующего шага экспандирования на предыдущие.

Ключевые слова: трубный передел, экспандирование, коэффициент экспандирования, технология экспандирования, коэффициент первой подачи, овальность, кривизна профиля

Для цитирования: Баталов Г.С., Машенцева М.С. Влияние схемы экспандирования на напряженно-деформированное состояние труб и геометрические показатели // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 3. С. 38–47. DOI: 10.14529/met250304

Original article
DOI: 10.14529/met250304

INFLUENCE OF THE EXPANSION SCHEME ON THE STRESS-STRAIN STATE OF PIPES AND GEOMETRIC PARAMETERS

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 paper presents a study of the effect of pipe expansion on its final geometric parameters. The main geometric characteristic is the ovality of the finished pipe. Computer modeling was carried out with a change in the expansion coefficient, with various expansion technologies and with a change in the first feed coefficient. The impact of the subsequent expansion step on the previous ones was also assessed.

Keywords: pipe redevelopment, expansion, expansion coefficient, expansion technology, first feed factor, ovality, pipe profile curvature

For citation: Batalov G.S., Mashentseva M.S. Influence of the expansion scheme on the stress-strain state of pipes and geometric parameters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2025;25(3):38–47. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250304

Введение

Экспандирование является заключительной формообразующей операцией в переделе лист-труба. Эта операция позволяет стабилизировать механические свойства материала, а также способствует снижению остаточных напряжений. Главной задачей экспандирования является придание трубе заданных геометрических параметров, которые будут соответствовать необходимым требованиям.

Конечно-элементное моделирование позволяет оптимизировать и подобрать наилучшую технологию экспандирования с учетом накопленного напряженно-деформированного состояния после предыдущих формообразующих операций. Моделирование в 3D-постановке позволяет рассмотреть большое количество технических решений в короткие сроки, при этом не неся большие затраты на натурный эксперимент.

В разной степени влияние на конечные геометрические параметры трубы оказывает коэффициент экспандирования, коэффициент первой подачи трубы, технология с применением различных коэффициентов экспандирования для тела и концов трубы, а также отклонение оси экспандера от оси трубы.

В рамках исследования проведено моделирование операции экспандирования трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 21,6 мм с различными вариациями вышеперечисленных факторов, оказывающих влияние на овальность трубы и отклонение от прямолинейности образующей профиля трубы.

Начальные и граничные условия

За исходную модель принята труба типоразмерами 1420×21,6 мм с учетом накопленного напряженно-деформированного состояния от предшествующих формообразующих операций: вальцевая формовка, догибка кромок, сборка и сварка.

В качестве контрольных показателей влияния на конечную геометрию трубы использовали следующие параметры [1–3]:

– наибольший и наименьший диаметр трубы по концам;

– овальность по концам трубы;

– кривизна по телу трубы.

Овальность трубы вычисляли по формуле

$$O = D_{\max} - D_{\min}, \quad (1)$$

где D_{\max} – максимальный диаметр трубы, мм;
 D_{\min} – минимальный диаметр трубы, мм.

Исследование влияния коэффициента экспандирования

Моделирование процесса экспандирования производили с коэффициентами 0,9 и 1,2 с коэффициентом первой подачи 85 % и перекрытием шагов 10 мм. Начальная ширина листа, необходимая для получения требуемого коэффициента экспандирования (k_3), рассчитывается по формуле

$$L = \frac{\pi(D-s)}{1+k_3}, \quad (2)$$

где D – наружный диаметр готовой трубы после процесса экспандирования, мм;

s – толщина стенки трубы, мм;

k_3 – коэффициент экспандирования (%).

Измерение профиля трубы производили путем выгрузки данных из Marc Mentant в Excel с автоматизацией посредством создания макроса [4]. Графическая интерпретация измерения овальности для экспандирования с $k_3 = 0,9$ представлена на рис. 1. Результаты измерений сведены в табл. 1.

Овальность на переднем конце после экспандирования получилась больше в 5 раз, чем на заднем конце трубы несмотря на то, что изначально была меньше.

Помимо овальности контролируемым геометрическим фактором является кривизна трубы как отклонение образующей от прямолинейности. Ее измерение проводилось в двух направлениях: по сварному шву (12 часов) и на 180 градусов по телу трубы (6 часов). Анализ реализован тем же методом, что и измерение овальности трубы, результаты измерений представлены в табл. 2, графическая интерпретация – на рис. 2 и 3.

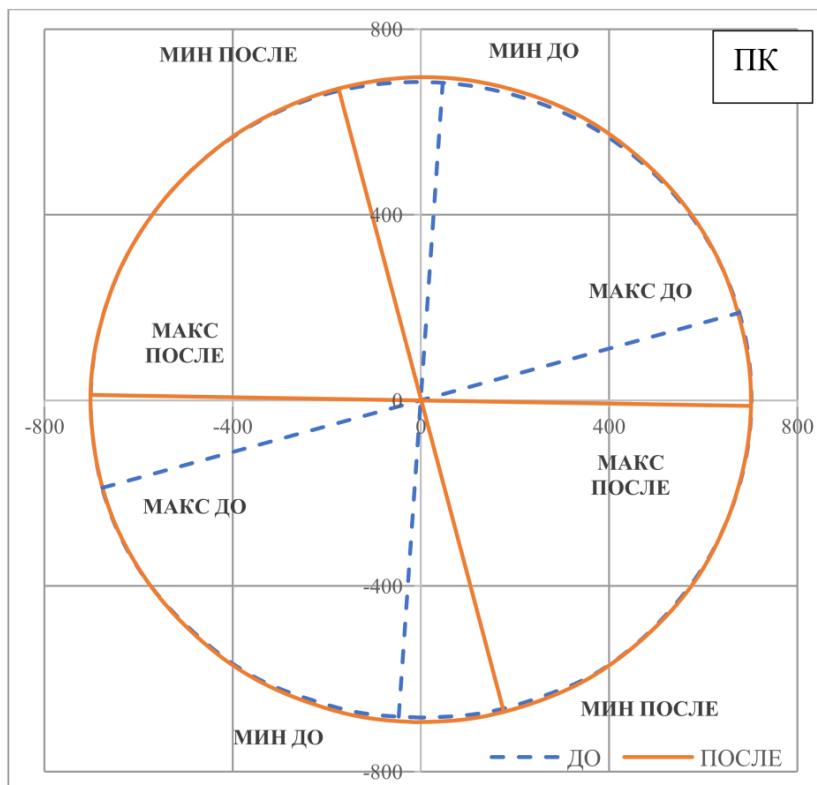
Таблица 1

Результаты измерений геометрических параметров конечно-элементной модели с $k_3 = 0,9$

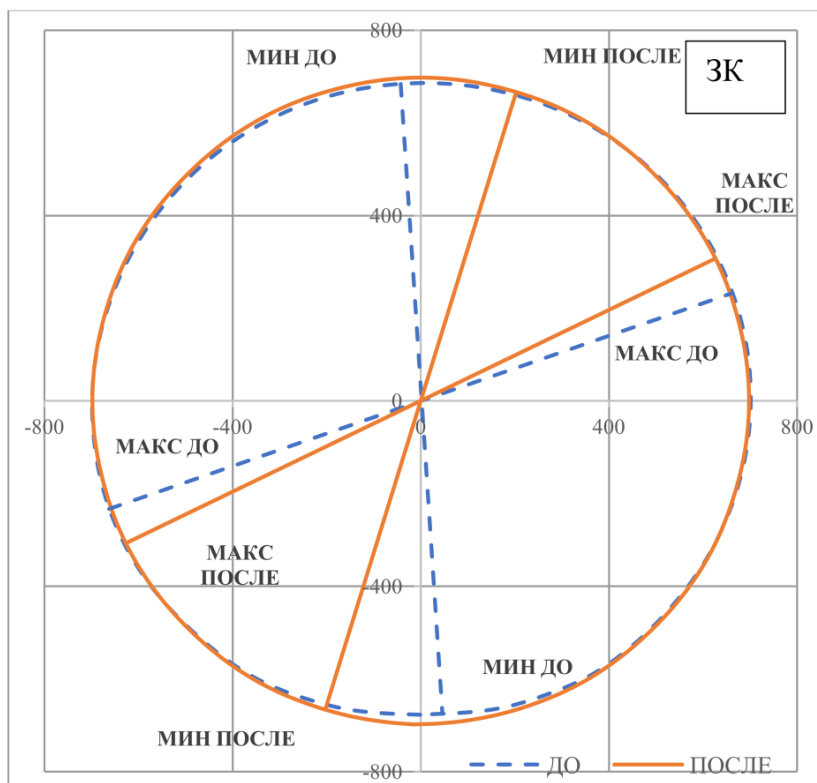
Table 1

Results of measurement of geometric parameters of finite element model with $k_3 = 0.9$

Состояние трубы	ПК			ЗК		
	D_{\min} , мм	D_{\max} , мм	O , мм	D_{\min} , мм	D_{\max} , мм	O , мм
До экспандирования	1390,9	1427,6	36,7	1383,7	1426,0	42,3
После экспандирования	1410,3	1425,7	15,4	1414,8	1418,1	3,1



а)



б)

Рис. 1. Профиль торца трубы до и после экспандирования:
а – передний конец (ПК); б – задний конец (ЗК)
Fig. 1. Pipe end profile before and after expansion:
а – front end (FE); б – rear end (RE)

Таблица 2

Результаты измерений кривизны профиля модели с $k_3 = 0,9$

Table 2

Model profile curvature measurements with $k_3 = 0.9$

Состояние трубы	Кривизна профиля на 6 часов, мм	Кривизна профиля на 12 часов, мм
До экспандирования	5,1	4,7
После экспандирования	3,2	7,1

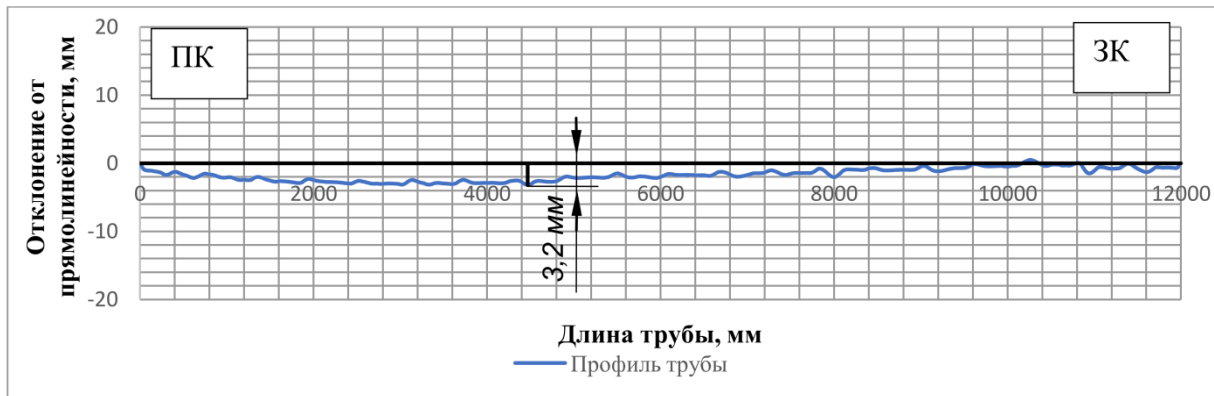


Рис. 2. Профиль образующей трубы после экспандирования, $k_3 = 0,9$ (на 6 часов)

Fig. 2. Pipe profile after expansion, $k_3 = 0.9$ (at 6 o'clock)

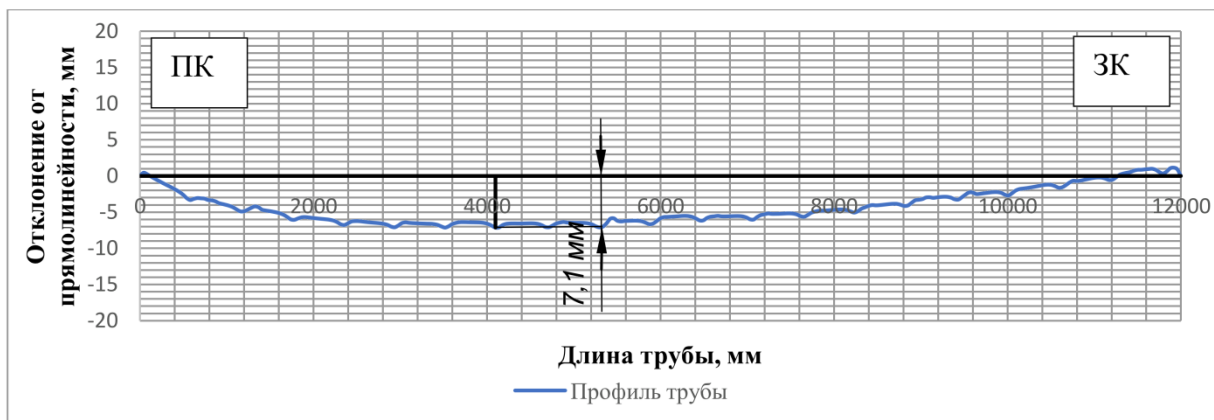


Рис. 3. Профиль образующей трубы после экспандирования $k_3 = 0,9$ (на 12 часов)

Fig. 3. Pipe profile after expansion, $k_3 = 0.9$ (at 12 o'clock)

На заднем и переднем концах трубы прослеживается отклонение от прямолинейности. Общая кривизна трубы в области на 6 часов составила 3,2 мм и 7,1 мм – в области на 12 часов.

Экспандирование с коэффициентом 1,2 проводили при тех же условиях, что и с коэффициентом 0,9, что необходимо для проведения сравнительного анализа конечной геометрии трубы.

По результатам расчета овальность переднего конца после экспандирования снизилась приблизительно в 3 раза, а заднего – в 10 раз. Разница между передним и задним концом после экспандирования составила 8,4 мм (табл. 3). Отклонение на переднем и заднем

конце почти одинаковое – 7,2 мм и 7,3 мм соответственно, результаты представлены в табл. 4, графически – на рис. 4 и 5.

По результатам моделирования установлено, что коэффициент экспандирования влияет на геометрические параметры труб следующим образом:

- при увеличении процента экспандирования наблюдается незначительное исправление торцевой овальной;

- продольная общая кривизна на 6 часов с $k_3 = 0,9$ уменьшается, а с $k_3 = 1,2$ увеличивается в $\sim 1,5$ раза. Общая кривизна на 12 часов с обоими коэффициентами выросла в $\sim 1,5$ раза.

Таблица 3

Результаты измерений геометрических параметров конечно-элементной модели с $k_3 = 1,2$

Table 3

Results of measurement of geometric parameters of finite-element model with $k_3 = 1.2$

Состояние трубы	ПК			ЗК		
	D_{\min} , мм	D_{\max} , мм	ΔD , мм	D_{\min} , мм	D_{\max} , мм	ΔD , мм
До экспандирования	1390,9	1427,6	36,7	1383,7	1426,0	42,3
После экспандирования	1414,4	1427,0	12,6	1416,7	1420,8	4,2

Таблица 4

Результаты измерений кривизны профиля модели с $k_3 = 1, 2$

Table 4

Model profile curvature measurements with $k_3 = 1.2$

Состояние трубы	Кривизна профиля на 6 часов, мм	Кривизна профиля на 12 часов, мм
До экспандирования	5,1	4,7
После экспандирования	7,2	7,3

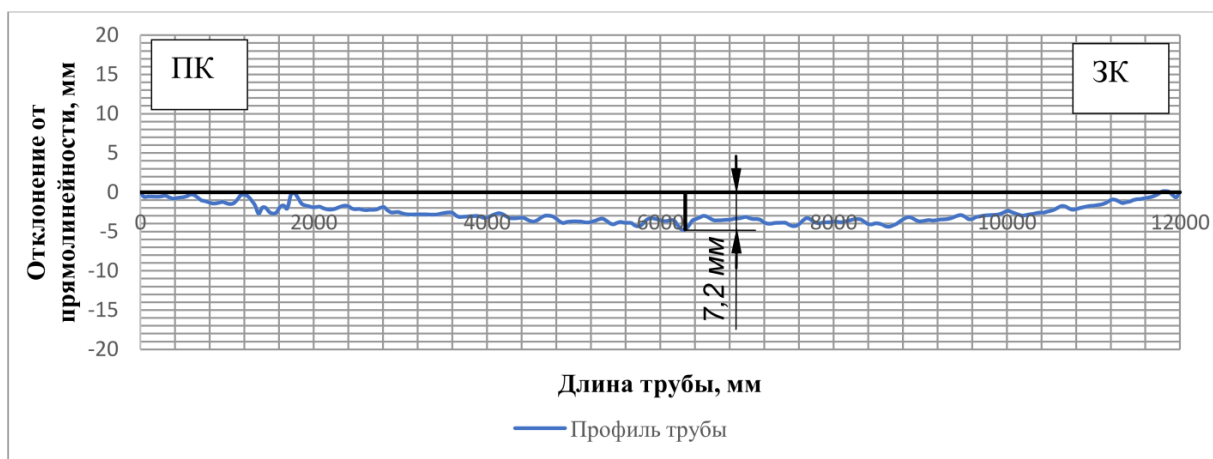


Рис. 4. Профиль образующей трубы после экспандирования $k_3 = 1, 2$ (на 6 часов)
 Fig. 4. Pipe profile after expansion, $k_3 = 1.2$ (at 6 o'clock)

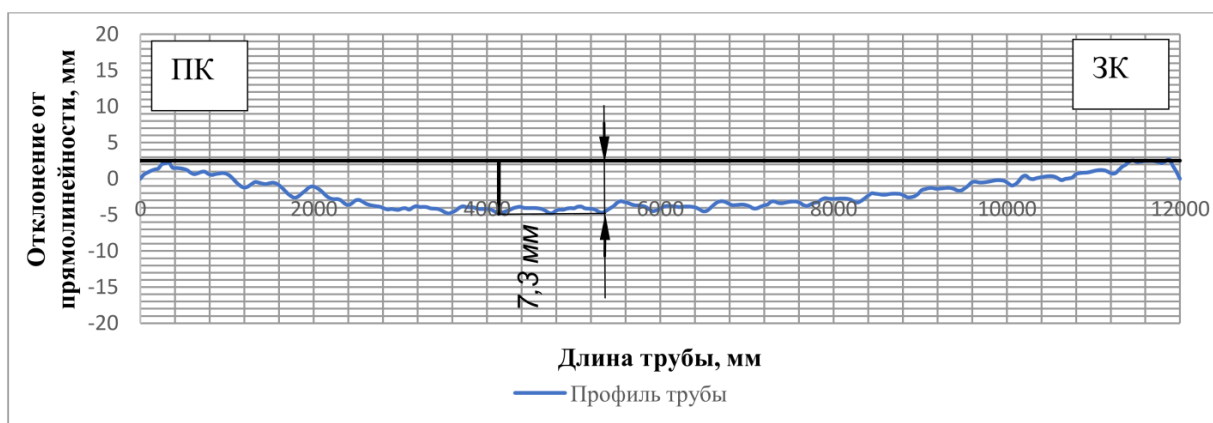


Рис. 5. Профиль образующей трубы после экспандирования $k_3 = 1, 2$ (на 12 часов)
 Fig. 5. Pipe profile after expansion, $k_3 = 1.2$ (at 12 o'clock)

Исследование влияния технологии экспандирования

Под технологией экспандирования в данном исследовании понимается различный коэффициент экспандирования по телу трубы и ее концам. Для исследования выбраны две технологии:

- технология № 1: по телу трубы $k_s = 0,9$, по концам трубы $k_s = 1,2$;
- технология № 2: по телу трубы $k_s = 1,2$, по концам трубы $k_s = 1,3$.

Результаты моделирования сведены в табл. 5.

Анализ результатов показал, что технология экспандирования влияет на геометрические параметры труб следующим образом:

- концевая овальность существенно не отличается;
- продольная общая кривизна на 6 часов увеличивается в ~ 2 раза. Общая кривизна на 12 часов практически не изменяется.

Сравнивая первый вариант технологии с конечно-элементной моделью с неизменным по всей длине трубы $k_s = 0,9$, можно отметить незначительное увеличение овальности заднего конца трубы, а также снижение продольной кривизны на 2,0 мм на 6 часов.

Второй вариант технологии экспандирования сравнивали с конечно-элементной моделью, где неизменный $k_s = 1,2$ по всей трубе. При смене технологии на переменный k_s овальность переднего конца увеличилась на 3,9 мм (24 %). Отклонение от прямолинейности на 6 часов снизилось на 1,7 мм (24 %).

Исследование влияния коэффициента первой подачи ($k_{п1}$) на геометрические параметры труб

Для исследования выбраны 4 модели экспандирования:

- с коэффициентом подачи 65 %;
- с коэффициентом подачи 75 %;
- с коэффициентом подачи 85 %;
- с пропуском первого шага и последующей обратной деформацией.

Чтобы определить влияние коэффициента первой подачи, варьировали величину длины соприкосновения рабочей поверхности накладки экспандера с поверхностью трубы на первом шаге. Моделирование проводили при коэффициенте экспандирования 0,9. В модели с пропуском первого шага экспандирование проводилось, как и в самом первом рассмотренном варианте с коэффициентом 0,9 – задавался коэффициент первой подачи 85 % и перекрытие шагов 10 мм с изменением последовательности шагов экспандирования. Сегмент экспандера смещен на величину одного шага по направлению движения экспандера, таким образом экспандирование проводили со второго шага. Экспандирование переднего конца трубы проводили в последнюю очередь.

В табл. 6 сведены геометрические параметры конечно-элементных моделей, результаты расчета экспандирования с коэффициентом подачи 85 % приведены раньше (см. табл. 1).

При увеличении площади контакта сегментов экспандера с трубой на первом шаге также увеличивается овальность на переднем конце трубы. При $k_{п1} = 65$ % овальность составила 13,4 мм, при $k_{п1} = 75$ % – 15,4 мм, при $k_{п1} = 85$ % овальность не изменилась.

На заднем конце обратная тенденция – с увеличением $k_{п1}$ овальность снижается. Овальность на заднем конце составила 5,0; 3,8 и 3,0 мм соответственно. Полученные зависимости представлены в виде графика на рис. 6. Стоит отметить, что при увеличении $k_{п1}$ площадь контакта на заднем конце трубы также изменяется.

Результаты измерений геометрических параметров конечно-элементной модели

Таблица 5

Table 5

Results of measurement of geometric parameters of finite element model

$k_s = 0,9$ по телу трубы и $k_s = 1,2$ на концах трубы						
Состояние трубы	ПК			ЗК		
	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм
До экспандирования	1390,9	1427,6	36,7	1383,7	1426,0	42,3
После экспандирования	1411,1	1426,8	15,7	1415,7	1420,0	4,3
$k_s = 1,2$ по телу трубы и $k_s = 1,3$ на концах трубы						
Состояние трубы	ПК			ЗК		
	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм
До экспандирования	1390,9	1427,6	36,7	1383,7	1426,0	42,3
После экспандирования	1391,5	1429,6	16,5	1417,7	1422,4	4,6

Таблица 6

Результаты измерений геометрических параметров конечно-элементной модели

Table 6

Results of measurement of geometric parameters of finite element model

$k_s = 0,9$ и $k_n = 65\%$						
Состояние трубы	ПК			ЗК		
	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм
До экспандирования	1390,9	1427,6	36,7	1383,7	1426,0	42,3
После экспандирования	1411,3	1424,7	13,4	1413,7	1418,7	5,0
$k_s = 0,9$ и $k_n = 75\%$						
Состояние трубы	ПК			ЗК		
	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм
До экспандирования	1390,9	1427,6	36,7	1383,7	1426,0	42,3
После экспандирования	1410,1	1425,5	15,4	1414,5	1418,2	3,8
$k_s = 0,9$ с пропуском первого шага						
Состояние трубы	ПК			ЗК		
	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм	D_{min} , мм	D_{max} , мм	ΔD , мм
До экспандирования	1390,9	1427,6	36,7	1383,7	1426,0	42,3
После экспандирования	1407,9	1424,7	16,8	1414,0	1418,3	4,3

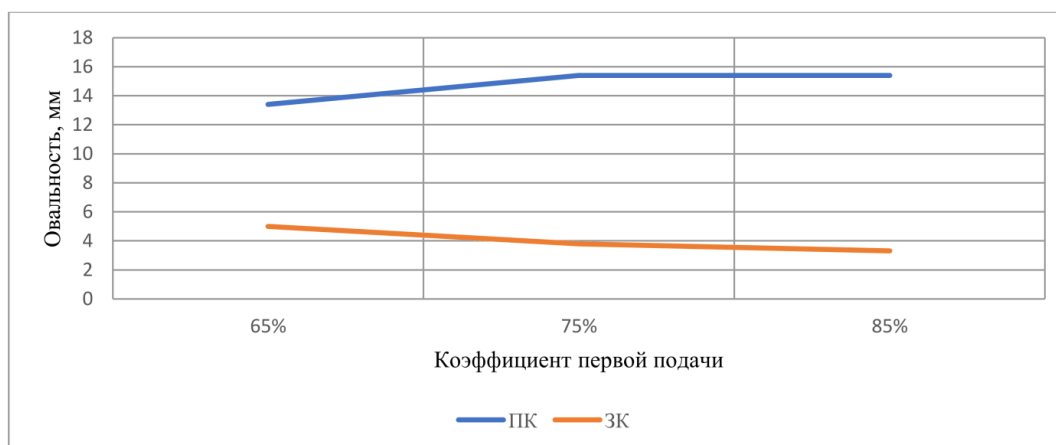


Рис. 6. Влияние коэффициента первой подачи на овальность трубы
 Fig. 6. Effect of first feed factor on pipe out-of-roundness

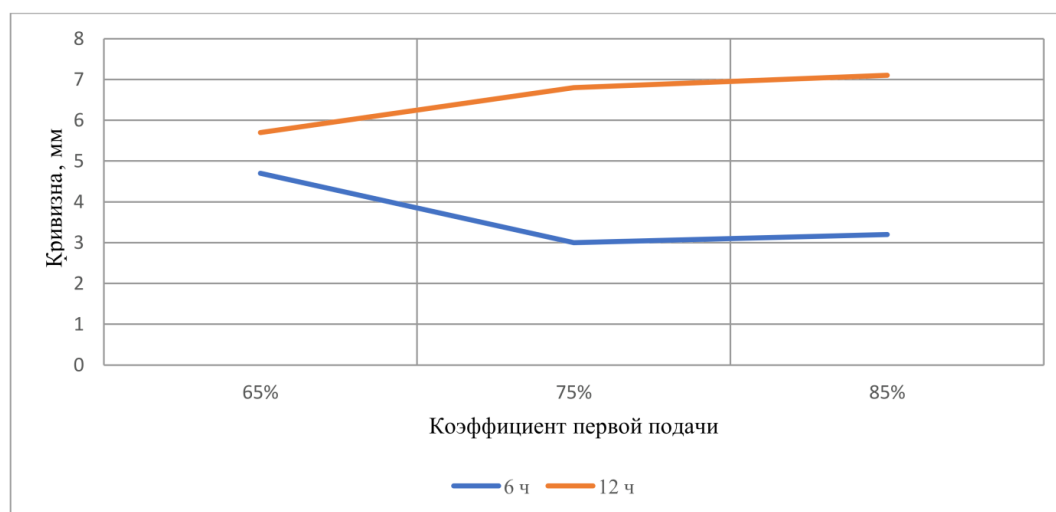


Рис. 7. Влияние коэффициента первой подачи на кривизну профиля трубы
 Fig. 7. Effect of first feed factor on pipe profile curvature

Кривизна по телу трубы на 6 часов снижается при увеличении $k_{п}$, в порядке возрастания площади контакта в первом шаге получены следующие значения: 4,7; 3,0 и 3,2 мм. На 12 часов, рядом со швом, кривизна увеличивается – 5,7; 6,8 и 7,1 мм. Графическая интерпретация результатов представлена на рис. 7.

При пропуске первого шага незначительно увеличилась овальность обоих концов трубы, а также выросла кривизна на 12 часов на 3,3 мм (32 %).

Исследование изменения овальности при максимальном расширении экспандера

При максимальном расширении головки экспандера деформация трубы происходит не только в месте контакта инструмента с телом

трубы. Для определения длины внеконтактного участка на конечно-элементной модели производили замеры овальности во время экспандирования [5]. Экспандирование заготовки осуществляли за 21 шаг.

Исследование проводилось следующим образом. Проводили расчет овальности по данным, полученным в момент максимального расширения головки экспандера, в течение трех ее последовательных ходов (рис. 8–10).

Анализ результатов показал, что на одиннадцатом шаге овальность уменьшилась на 2,7 мм, причем максимальное ΔO зафиксировано на расстоянии 2700 мм от крайней точки контакта головки экспандера с трубой по ходу экспандирования, на двенадцатом шаге максимум ΔO равен 1,4 мм на расстоянии 750 мм (см. рис. 10). Также можно заметить, что экспандирование в середине трубы приводит к

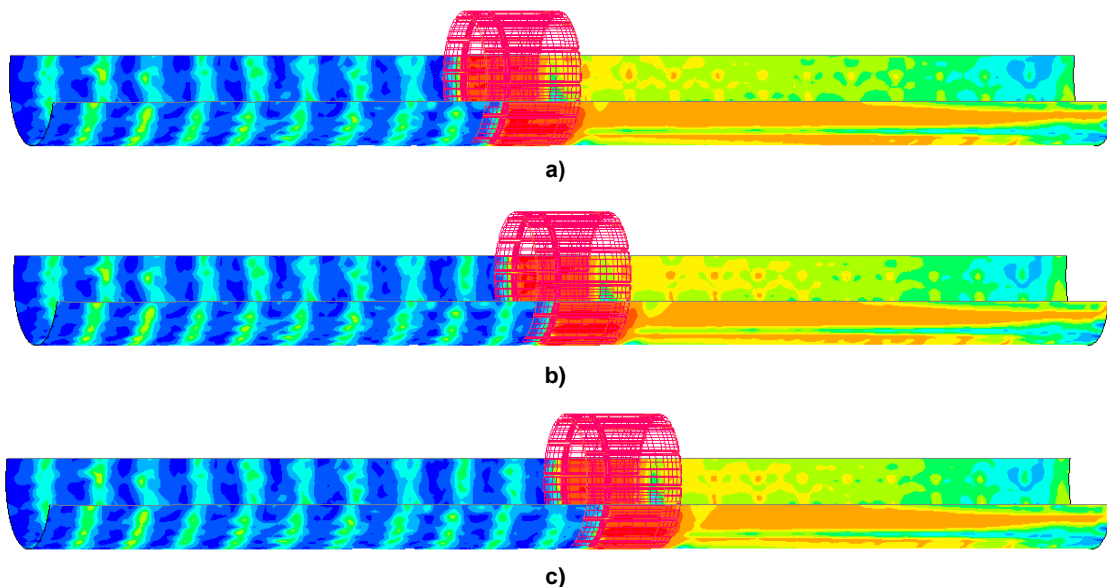


Рис. 8. Положение головки экспандера в момент измерения овальности: а – 10-й шаг; б – 11-й шаг; с – 12-й шаг

Fig. 8. Expander head position at the moment of ovality measurement: а – 10th step; б – 11th step; с – 12th step

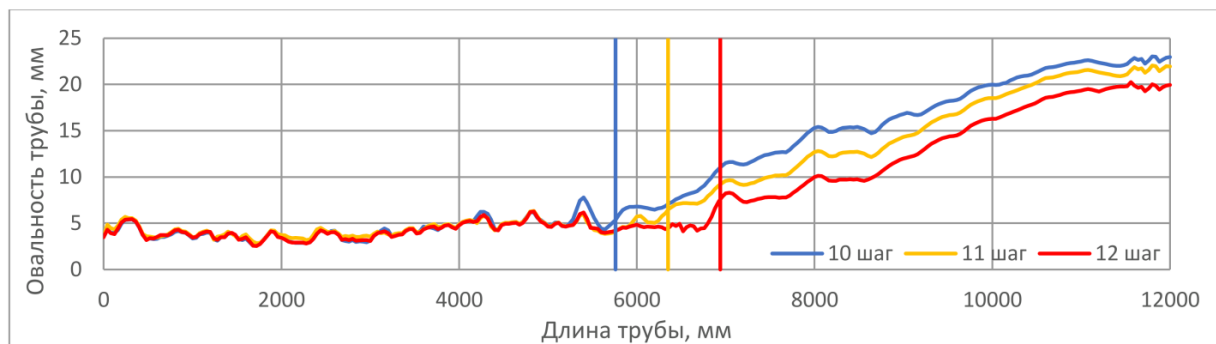


Рис. 9. Величина овальности по длине трубы
Fig. 9. Pipe length out-of-roundness

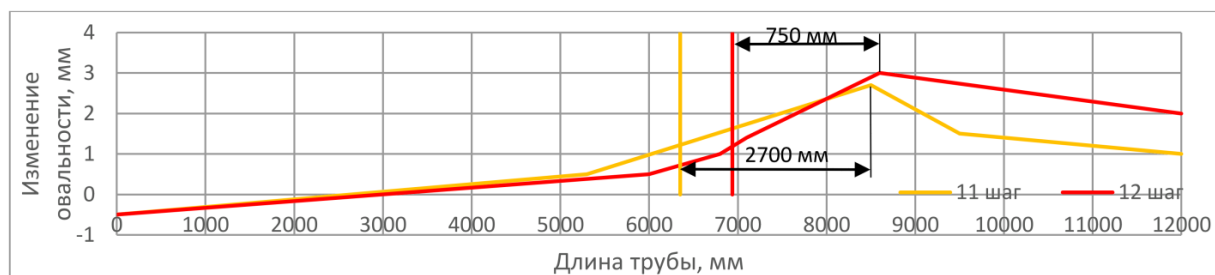


Рис. 10. Изменение овальности по длине трубы
Fig. 10. Change pipe length out-of-roundness

незначительному увеличению овальности уже экспандированного конца трубы, которая не превышает 0,5 мм.

Аналогичные измерения были проведены на ПК и ЗК трубы. Таким образом, можно сделать вывод, что каждый последующий шаг экспандирования оказывает незначительное влияние на предыдущие.

Выводы

1. Проведено моделирование процесса экспандирования трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 21,6 мм с учетом накопленного напряженно-деформированного состояния от предшествующих формообразующих операций, включая формовку с деформируемым верхним валком [6].

2. Исследовано влияние коэффициента экспандирования на концевую овальность и кривизну труб. Установлено, что при увеличении коэффициента экспандирования увеличи-

вается общая продольная кривизна труб в области на 6 часов, при этом наблюдается снижение концевой овальности.

3. Установлено, что увеличение коэффициента первой подачи благоприятно сказывается на овальности переднего конца трубы и общей кривизне в области сварного шва (12 часов). При этом незначительно ухудшаются параметры овальности заднего конца и кривизна в области на 6 часов.

4. Проведен анализ влияния последующих шагов экспандирования на предыдущие, и как итог – влияние на конечную овальность трубы по всей ее длине. Выявлено незначительное влияние, изменение овальности не превышает 0,8 мм.

5. Наиболее предпочтительным вариантом, который обеспечивает требование концевой овальности не более 1 %, является экспандирование с общим коэффициентом 0,9–1,2 и $k_{\text{п}} = 85 \%$ с перекрытием шагов 10 мм.

Список литературы

1. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю. Применение моделирования для исследования качества сварных труб по геометрическим размерам // Черные металлы. 2021. № 4. С. 9–13. DOI: 10.17580/chm.2021.04.02
2. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю. Моделирование процесса экспандирования сварных труб большого диаметра // Сталь. 2017. № 3. С. 41–43.
3. 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.
4. Бычков М.И. Основы программирования на VBA для Microsoft Excel: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 99 с.
5. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МАКС Пресс, 2009. 436 с.
6. 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

References

1. 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
2. Kolikov A.P., Zvonarev D.Y. Expansion of large-diameter welded pipe. *Steel in Translation*. 2017;47(3):210–212. DOI: 10.3103/S0967091217030068
3. 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.)
4. Bychkov M.I. *Osnovy programmirovaniya na VBA dlya Microsoft Excel: ucheb. posobie* [Fundamentals of programming in VBA for Microsoft Excel: a textbook]. Novosibirsk: NSTU Publ., 2010. 99 p. (In Russ.)
5. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Pryalov S.N. *Osnovy chislennogo modelirovaniya magistral'nykh truboprovodov* [Fundamentals of Numerical Modeling of Trunk Pipeline]. 2nd ed., revised and add. Moscow: MAKS Press, 2009. 436 p. (In Russ.)
6. 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

Информация об авторах

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@tmk-group.com.

Information about the authors

German S. Batalov, Head in the Pipe Forming Sector, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; german.batalov@tmk-group.com.

Maria S. Mashentseva, Researcher in the Pipe Forming Sector, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; mashentseva@tmk-group.com.

Статья поступила в редакцию 28.03.2025

The article was submitted 28.03.2025