

# МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.77

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ ПРИ РАЗДАЧЕ

**Богатов А.А.**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Обработка металлов давлением»  
**Салихьянов Д.Р.**, аспирант, ассистент (salenhall@gmail.com)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** В настоящее время одним из востребованных видов металлопродукции являются стальные трубы конструкционного назначения. Важнейшими их характеристиками являются точность размеров и чистота поверхности, высокий уровень механических свойств и служебных характеристик. Особое внимание уделяется точности внутреннего канала труб, так как этот параметр определяет эксплуатационную надежность и экономическую эффективность их применения. Одним из наиболее эффективных способов повышения точности является раздача трубы на оправке. Для исследования точности труб целесообразно использовать пакеты конечно-элементного моделирования. Их применение позволило исследовать внеконтактную раздачу на входе и выходе из очага деформации, неравномерность деформации и коэффициент повышения точности. Определение этих характеристик является важным условием для разработки оптимальных режимов деформации и конструкции инструмента для получения особоточных труб по внутреннему диаметру.

**Ключевые слова:** горячекатаные трубы, точность внутреннего канала труб, показатель точности, раздача труб на оправке.

Стальные трубы являются одним из самых востребованных видов металлопроката. Они нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Наиболее важными характеристиками, определяющими их срок эксплуатации, надежность и экономическую эффективность, являются механические свойства, чистота поверхности и точность размеров. Холоднодеформированные трубы отличаются высокой точностью размеров и чистотой внутренней поверхности. Точность размеров и чистота внутренней поверхности во многом определяют срок службы труб в таких отраслях, как нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность, атомная энергетика, химическое машиностроение и др. Однако применение холоднодеформированных труб не всегда экономически целесообразно ввиду их высокой стоимости. Эффективным способом повысить точность внутреннего диаметра и качество внутренней поверхности горячекатаных труб является операция калибрования способом раздачи трубы на оправке. Например, в соответствии с ГОСТ Р 52203-2004, наружный диаметр насосно-компрессорной трубы 73×5,5 мм может быть в диапазоне от 72,2 до 73,8 мм, а толщина стенки – от 4,8 до 5,9 мм. Таким образом, внутренний диаметр трубы находится в диапазоне от 60,4 до 64,2 мм. Этот диапазон значений можно уменьшить, применяя калибровку внутреннего диаметра труб. Кроме того, способом раздачи трубы уменьшаются величины шероховатости: для горячекатаных труб  $Ra = 40 - 50$  мкм; для холоднодеформированных  $Ra \leq 0,5 - 0,6$  мкм. Повышение точности внутреннего диаметра и уменьшение шероховатости поверхности способствуют уменьшению интенсивности коррозионных процессов и образованию асфальто-

солевых отложений и, соответственно, повышению долговечности труб при добыче нефти.

При раздаче трубы на оправке происходит одновременное увеличение внутреннего диаметра, изменение толщины стенки и длины трубы, а также уменьшение шероховатости на внутренней поверхности. Закономерности их изменения, а также изменение силы раздачи в зависимости от способа и режимов процесса являются предметом исследования.

В большинстве работ [1 – 5] основной целью являлось изучение силовых нагрузок процесса раздачи. Особенности формоизменения и точность труб после раздачи практически не рассматривались. С учетом вышеизложенного целями данной работы являлись исследования внеочаговой упруго-пластической деформации и изменения диаметра внутренней поверхности трубы в результате калибрования, оценка эффективности процесса калибрования способом раздачи и разработка технических предложений повышения точности размеров труб при калибровании на оправке.

В работе методом конечно-элементного моделирования (МКЭ-моделирования) с помощью программного комплекса Deform-3D исследовано формоизменение трубы при раздаче, определены границы зоны внеконтактной пластической деформации, дана оценка точности труб после раздачи. На рис. 1, а представлен очаг деформации для одного из вариантов численного решения методом МКЭ. Граница начала пластической деформации определялась по интенсивности пластической деформации  $\epsilon_n$  – пластическая деформация наступает при достижении величины 0,002. Участок, на котором начиналось сужение внутреннего диаметра трубы был принят как конец внеконтактного участка раздачи трубы.

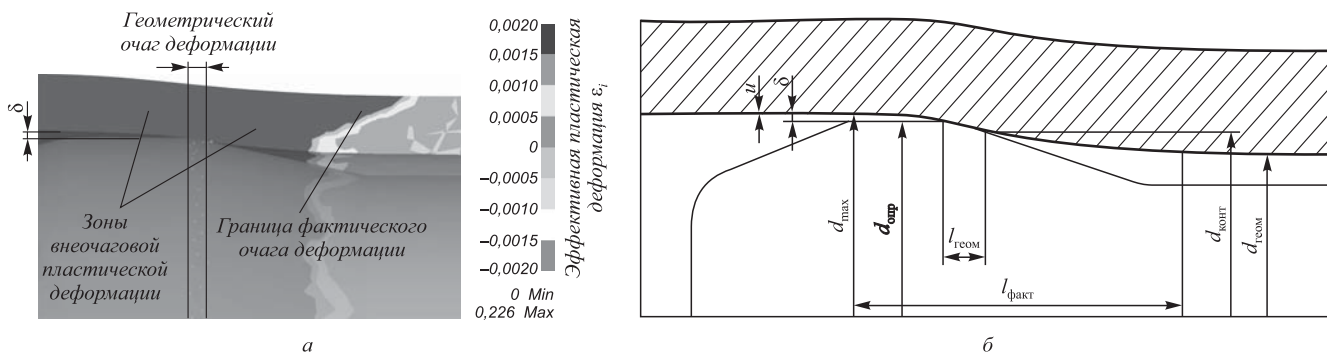


Рис. 1. Очаг деформации при МКЭ-моделировании процесса раздачи (а) и схема очага деформации (б)

Fig. 1. Deformation zone in the FEM simulation of the process of expansion (a) and scheme of the deformation zone (b)

На рис. 1, б изображена схема очага деформации, в соответствии с которой исследовались величины, характеризующие внеконтактную пластическую деформацию.

Раздача происходит за счет перемещения оправки, соединенной с тяговым органом волочильного стана. Очаг деформации трубы при раздаче состоит из нескольких характерных участков (рис. 1, а): линейного участка непосредственного контакта трубы и конусной оправки, являющегося геометрическим очагом деформации длиной  $l_{\text{геом}}$  и двух криволинейных участков на входе и выходе, являющихся зонами внеконтактной пластической деформации. Общая длина очага пластической деформации равна  $l_{\text{факт}}$ . Величина увеличения внутреннего диаметра трубы  $\delta$  является характеристикой внеочаговой пластической деформации на выходе из очага деформации, а величина уменьшения внутреннего диаметра трубы  $u$  характеризует упругое разгрузку трубы. Внеочаговая упругопластическая деформация характеризуется степенью внеконтактной раздачи трубы на входе в очаг деформации  $\Delta\epsilon_0 = \frac{d_{\text{конт}} - d_{\text{геом}}}{d_{\text{геом}}}$  и

$$\text{на выходе } \Delta\epsilon_1 = \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{опр}}}{d_{\text{опр}}}.$$

При решении задачи раздачи трубы в качестве модели материала трубы использована упруго-пластическая упрочняемая среда, в качестве материала была выбрана сталь AISI-1045 из библиотеки материалов Deform-3D, являющаяся аналогом стали 45. Угол конусности рабочей части оправки принят равным  $12^\circ$ , а диаметр калибрующей части оправки  $d_{\text{опр}} = 64$  мм. Внутренний диаметр трубы в исходном состоянии в зависимости от ее точности может иметь любое значение из диапазона, указанного в таблице. Коэффициент толстостенности труб имел два значения  $m = 1,15$  и  $1,2$ , где  $m$  равна отношению наружного диаметра к внутреннему. Трубы раздавались со степенью раздачи  $\epsilon = 0,5 - 5,0 \%$ , где  $\epsilon = \frac{d_{\text{опр}} - d_{\text{вн0}}}{d_{\text{вн0}}} 100 \%$ .

В качестве оценки соотношения длины геометрического и фактического очага деформации выбрано отношение  $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$ . На рис. 2 представлен график за-

висимости отношения  $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$  от степени раздачи  $\epsilon$ , из которого видно, что при всех степенях деформации сохраняется низкое значение  $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$  (от 0,07 до 0,14), из чего следует, что для обеспечения высокой точности труб в процессе раздачи крайне важно обеспечивать осевую симметрию трубы и оправки.

Точность калиброванных труб зависит от величины внеконтактной деформации на выходе  $\Delta\epsilon_1$ . На рис. 3 приведены графики зависимости степени внеконтактной деформации на входе  $\Delta\epsilon_0$  и на выходе  $\Delta\epsilon_1$  от степени раздачи  $\epsilon$ . Из графиков видно монотонное возрастание обеих величин от степени раздачи, причем для более тонкостенных труб наблюдается большая степень внеконтактной деформации на входе и выходе.

В данной работе точность внутреннего диаметра труб оценивалась отношениями:

$$\text{до раздачи } p_0 = \frac{d_{\text{опр}} - d_{\text{вн0}}}{2d_{\text{ср0}}},$$

$$\text{где } d_{\text{ср0}} = d_{\text{вн0}} + \frac{d_{\text{опр}} - d_{\text{вн0}}}{2};$$

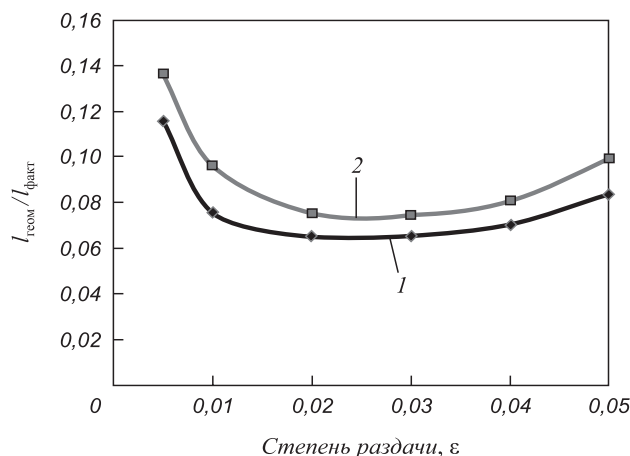


Рис. 2. Зависимость отношения длины геометрического и фактического очага деформации  $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$  от степени раздачи при  $m$ : 1 – 1,15; 2 – 1,20

Fig. 2. The dependence of the ratio of the geometric and the actual deformation zone with lengths  $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$  from an expansion ratio,  $m$ : 1 – 1,15; 2 – 1,20

$$\text{после раздачи } p_1 = \frac{d_{\text{вн1 max}} - d_{\text{вн1 min}}}{2d_{\text{ср1}}},$$

$$\text{где } d_{\text{ср1}} = d_{\text{вн1 min}} + \frac{d_{\text{вн1 max}} - d_{\text{вн1 min}}}{2}.$$

Значение диаметра оправки в вычислительном эксперименте было постоянным ( $d_{\text{опр}} = 64$  мм), а внутренний диаметр трубы имел значение в диапазоне от 60,8 до 63,68 мм. После калибрования трубы раздачей на оправке диапазон сужался, следовательно повышалась точность внутреннего диаметра труб (см. таблицу). Исследование было выполнено для показателей сил трения по Зиббелю  $\psi = 0,05; 0,15; 0,25$ .

Эффективность калибрования оценивалась изменением отношения  $p_0/p_1$ . Исходные данные и результаты изменения точности приведены в таблице для  $\psi = 0,15$ .

При раздаче трубы с малой степенью раздачи  $\epsilon = 0,5\%$  внутренний диаметр трубы стал меньше диаметра оправки, а с ростом степени раздачи  $\epsilon > 1,0\%$ ,

$d_{\text{вн1}} > d_{\text{опр}}$ . На рис. 4 приведен график коэффициента повышения точности, из которого видно, что в области значений степени раздачи  $\epsilon = 1 - 2\%$  эффективность калибрования внутреннего диаметра труб имеет наибольшее значение, а с ростом  $\epsilon$  до  $5\%$  эффективность снижается. С ростом показателя сил трения отношение  $p_0/p_1$  становится меньше.

Значение показателя точности внутреннего диаметра труб после калибрования можно определить, если известны величины внеочаговой деформации на выходе  $\delta$  и уменьшения внутреннего диаметра в результате разгрузки  $u$ , тогда  $p_1 = \frac{\delta - u}{d_{\text{опр}} + (\delta - u)}$ . При степени раздачи  $\epsilon = 0 - 2\%$  (см. рис. 4) значения величины внеочаговой деформации на выходе  $\delta$  и упругой усадки  $u$  соизмеримы. При увеличении степени раздачи эффективность калибрования падает, так как величина внеочаговой раздачи  $\delta$  превышает величину упругой усад-

**Результаты вычислительного эксперимента**

Исходный внутренний диаметр $d_0$ , мм	Относительная толщина стенки $m$	Показатель разброса значений внутренних диаметров труб $p_0$ , %	Степень раздачи $\epsilon$ , %	Конечный внутренний диаметр $d_1$ , мм	Показатель разброса значений внутренних диаметров труб после калибрования $p_1$ , %	Коэффициент повышения точности $p_0/p_1$
63,68	1,15	0,25	0,5	63,98	0,03	8,06
63,68	1,2		0,5	63,96		
63,36	1,15	0,5	1	64,05	0,055	9,09
63,36	1,2		1	63,98		
62,72	1,15	1,01	2	64,14	0,11	9,18
62,72	1,2		2	64,11		
62,08	1,15	1,52	3	64,27	0,21	7,24
62,08	1,2		3	64,23		
61,44	1,15	2,04	4	64,73	0,57	3,57
61,44	1,2		4	64,62		
60,8	1,15	2,56	5	65,07	0,83	3,08
60,8	1,2		5	64,9		

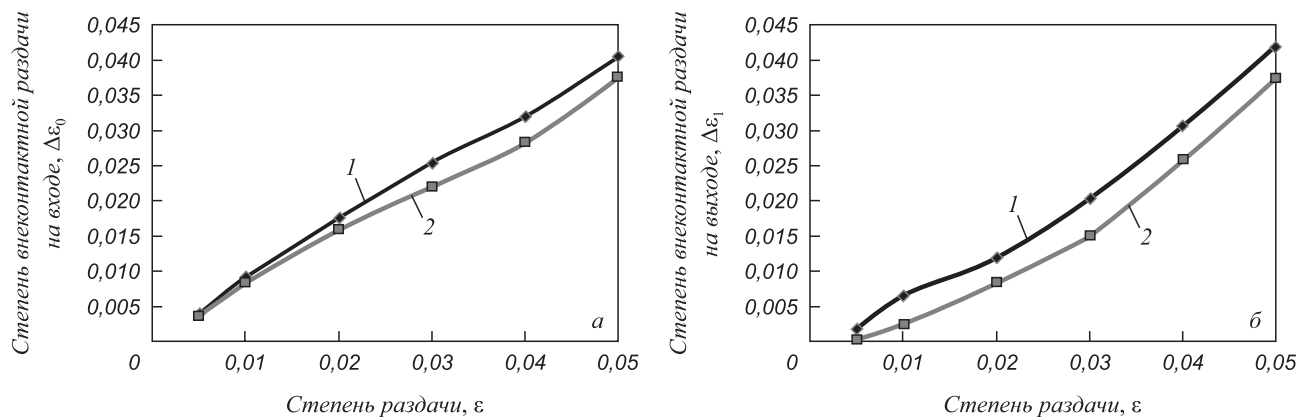


Рис. 3. Зависимость степеней внеконтактной деформации на входе (а) и выходе (б) от степени раздачи при  $m$ : 1 – 1,15; 2 – 1,20

Fig. 3. The dependence of the degrees of non-contact deformation at the inlet (a) and outlet (б) from an expansion ratio,  $m$ : 1 – 1.15; 2 – 1.20

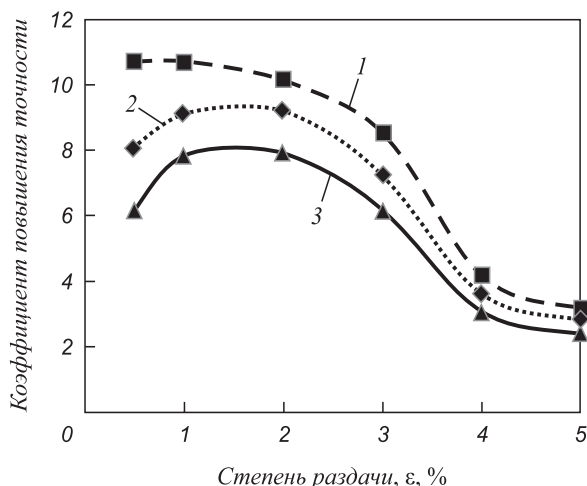


Рис. 4. Коэффициент повышения точности при  $\psi$ :  
1 – 0,05; 2 – 0,15; 3 – 0,25

Fig. 4. Accuracy increase ratio,  $\psi$ :  
1 – 0.05; 2 – 0.15; 3 – 0.25

ки и. Разница между этими величинами увеличивается с ростом степени раздачи  $\epsilon$ .

Таким образом, разработана методика изучения точности внутреннего диаметра труб при раздаче на оправке с использованием пакета МКЭ-моделирования и изучения формоизменения трубы при раздаче с учетом упруго-пластической деформации во внеоча-

говых зонах на входе и на выходе очага деформации. Результаты компьютерного моделирования показали, что за счет введения операции калибрования возможно уменьшение диапазона разброса значений внутренних диаметров горячекатаных труб как минимум в 3 раза. Для успешного проведения операции калибрования важно обеспечивать осевую симметрию трубы и оправки, а наибольшая эффективность процесса калибрования внутреннего диаметра труб достигается при малой степени раздачи в диапазоне от 1 до 2 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 673 с.
2. Исаев А.Н. Механическая схема деформации трубчатой заготовки в процессе дорнования отверстия // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2001. № 4. С. 6 – 11.
3. Daxner T., Rammerstorfer F.G., Fischer F.D. Instability phenomena during the conical expansion of circular cylindrical shells. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2005. Vol. 194. P. 2591 – 2603.
4. Yeh F. H. Study of flaring forming limit in the tube flaring process. // Journal of Strain Analysis. 2007. Vol. 42. P. 315 – 342.
5. Karrech A., Seibi A. Analytical model for the expansion of tubes under tension // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. P. 356 – 362.

© 2015 г. Богатов А.А., Салихьянов Д.Р.  
Поступила 20 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 1, pp. 35–38.

### INVESTIGATION OF THE PRECISION OF THE INTERNAL CHANNEL OF HOT-ROLLED PIPES DURING EXPANSION

**Bogatov A.A.**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Metal Forming”

**Salikhyanov D.R.**, Postgraduate, Assistant (salenhall@gmail.com)

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

**Keywords:** hot-rolled pipes, the precision of the internal channel in pipes, accuracy criterion, pipe expansion by a mandrel.

#### REFERENCES

1. Tarnovskii I.Ya., Pozdeev A.A., Gonago O.A., etc. *Teoriya obrabotki metallov davleniem (variatsionnye metody rascheta usilii i deformatsii)* [Theory of Metal Forming (variational methods for calculating forces and deformations)]. Moscow: Metallurgizdat, 1963. 672 p. (In Russ.).
2. Isaev A.N. Mechanical deformation pattern of tubular blank during mandreling of the hole. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*. 2001, no. 4, pp. 6–11. (In Russ.).
3. Daxner T., Rammerstorfer F.G., Fischer F.D. Instability phenomena during the conical expansion of circular cylindrical shells. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, vol. 194, pp. 2591–2603.
4. Yeh F.H. Study of flaring forming limit in the tube flaring process. *Journal of Strain Analysis*, 2007, vol. 42, pp. 315–342.
5. Karrech A., Seibi A. Analytical model for the expansion of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, pp. 356–362.

Received October 20, 2014