

УДК 621.774.63

ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ТРУБ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЗДАНИИ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ВНЕШНИХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

Чуманов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов» (chumanoviv@susu.ru)

Козлов А.В., д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» (kozlovav@susu.ru)

Матвеева М.А., ассистент кафедры «Техника и технологии производства материалов» (matveevama@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст
(456217, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева 16)

Аннотация. В современной высокотехнологичной промышленности широкое применение имеет технология гибки труб. Трубные отводы являются неотъемлемой частью трубопроводных систем. Наиболее широкое распространение имеют методы холодной гибки труб, которые сопровождаются рядом негативных явлений, таких как уменьшение толщины стенки на внешней сторонегиба, овализация поперечного сечения, образование гофр. Приведено исследование влияния технологии деформации трубных заготовок методом раскатывания с большим натягом на структуру и свойства материала заготовки. Метод деформации труб раскаткой с натягом позволяет получить радиальный изгиб заготовки, не приводя к ее разрушению и не вызывая явных дефектов поверхности и микроструктуры заготовки. Испытания проводились на образцах, изготовленных из стали 3сп и стали 12Х18Н10Т. Исследования микроструктуры проводились в соответствии с ГОСТ 5639 – 82; определение механических свойств – в соответствии с ГОСТ 1397 – 84; микротвердости – ГОСТ 9450 – 76. Исследовано влияние изменения геометрии трубной заготовки на структуру и свойства. Показано, что процесс деформации труб методом раскатки приводит к изменению механических свойств испытываемых материалов. Возрастают значения микротвердости и прочности, при этом уменьшается балл зерна. В процессе деформации возможно изменение микроструктуры материала в результате структурных превращений (закалки). При термомеханическом способе деформации пластическое течение металла предполагает возможное изменение структуры стенок трубы в результате перекристаллизации и термической обработки материала областигиба, что требует дальнейшего изучения и более глубокого анализа данной технологии.

Ключевые слова: трубная заготовка, раскатывание, трубогиб, деформация, микротвердость, механические свойства, микроструктура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-816-821

ВВЕДЕНИЕ

Технология гибки труб имеет широкое применение в высокотехнологичных отраслях – нефтяной, газовой, авто- и авиационной [1 – 4]. Отводы являются неотъемлемой частью трубопроводов, поэтому на сегодняшний день существует множество различных способов деформации труб. Наиболее распространены холодные методы гибки труб. Например, гибка с принудительным осевым перемещением, осуществляемая проталкиванием трубы между роликами. Такой метод нашел применение в серийном производстве [5 – 8]. Принцип осевого перемещения также применяется при гибке труб с использованием рогообразного дорна с увеличивающимся диаметром [9]. Однако для деформации таким способом необходим предварительный высокотемпературный нагрев труб и значительные осевые усилия для проталкивания дорна. Кроме того, при

использовании этого метода исключается возможность получения отводов с прямолинейными участками.

Гибка труб с нагружением изгибающим моментом (гибка «намоткой») [5, 10] происходит при свободном осевом перемещении трубы. Радиусгиба труб обеспечивается радиусом ролика-шаблона. Гибка «намотыванием» применяется в серийном и мелкосерийном производстве. Недостатком данного метода является то, что изгибаемый профиль в поперечном сечении трубы в области максимального изгиба искажается. К тому же этот метод не позволяет получить качественный гиб на малые радиусыгиба (до $1,5D$). Еще одним из способов холодной гибки труб является гибка поперечными силами [11, 12]. Труба по краям фиксируется упорами, а гибка осуществляется силой, приложенной к середине трубы. Такой способ не получил широкого применения и используется только в условиях единичного производства.

Зачастую холодная деформация труб сопровождается негативными явлениями: уменьшением толщины

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 11.9658.2017/8.9).

стенки на внешней сторонегиба, овализацией (сплющиванием) поперечного сечения трубы, образованием гофр. Для предотвращения образования этих дефектов труб применяются методы снижения усилий деформации труб. Например, применяются методы снижения предела текучести изгибаемой трубы с использованием общего или местного нагрева. Это позволяет снизить вероятность образования дефектов, возникающих при деформации [13, 14].

Недостатками приведенных способов гибки труб являются большие изгибающие усилия, а также энергозатраты, связанные с предотвращением образования дефектов в областигиба трубы. Кроме этого, не исключается вероятность потери устойчивости в зонегиба, что также приводит к деформации формы поперечного сечения. Также необходимо учитывать явление термомеханического упрочнения при деформации заготовки [14, 15]. Из работ [16, 17] следует, что в процессе деформации на поверхности заготовок формируются закалочные структуры, которые и являются причиной термомеханического упрочнения.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ РАСКАТКИ ТРУБ С БОЛЬШИМИ НАТЯГАМИ

Потенциальные возможности методов снижения усилия гибки за счет создания сложнапряженного состояния материала трубы превосходят возможные снижения усилия гибки за счет нагрева трубы. К этой группе методов относится гибка труб, раскатываемых с большими натягами [18 – 20], которая устраняет вышеперечисленные недостатки. К преимуществам данного метода относятся: возможность гибки тонкостенных труб на малые радиусагиба; снижение изгибаемых усилий, снижение энергетических и экономических затрат, уменьшение возможных искажений формы поперечного сечения трубы.

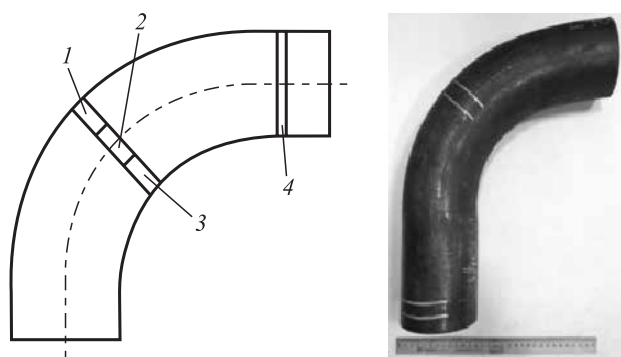


Рис. 1. Схема отбора кольцевых проб для микроструктурных исследований:

1, 2 и 3 – образцы наружной, боковой и внутренней стенки трубы;
4 – образец трубы, не подвергнутый раскатыванию

Fig. 1. Scheme of sampling for microstructural studies:
1, 2 and 3 – samples of outside, side and inner wall of the pipe;
4 – untreated pipe sample

Особенность технологии заключается в следующем. При вращении раскатной головки, заведенной в трубу с большим натягом, в каждой точке зоны раскатывания возникает знакопеременный изгиб, при котором напряжения в областигиба кратковременно достигают предела текучести. В результате при приложении небольшого изгибающего усилия происходит изгиб трубы [21, 22].

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В настоящей работе гибка труб проводилась на модернизированном трубогибе ИВ-3430 [23]. Трубогиб настраивался по следующим основным параметрам: натяг, скорость подачи трубы, вылет раскатника [24]. Возможность фиксировать температуру в областигиба отсутствует.

Для проведения исследований микротвердости были отобраны два кольцевых образца трубы, подвергнутой гибке раскатыванием (рис. 1). Материалом трубы служила сталь 3сп состава 0,16 % С, 0,24 % Si, 0,67 % Mn, 0,031 % S, 0,035 % P и сталь 12X18H10T состава 0,084 % С, 0,55 % Si, 1,12 % Mn, 17,39 % Cr, 9,42 % Ni, 0,52 % Ti, 0,018 % S, 0,031 % P. Размер образцов 110×6 мм. Химический состав образцов определялся на спектрометре МСА-1 в соответствии с ГОСТ 5632 – 2014. Отбор образцов велся по схеме, представленной на рис. 1. Один кольцевой образец из недеформированного участка трубы – эталонный, второй образец был взят непосредственно из областигиба.

Из полученных кольцевых образцов были вырезаны пробы с применением охлаждающей жидкости на абразивном отрезном станке Delta Abrasimet фирмы BUENLER, отшлифованы и с применением автоматического пресса Simplimet 1000 запрессованы в шайбы.

С использованием микротвердомера ИТВ-1 провели несколько замеров твердости по методу Виккерса с нагрузкой 4,905 Н (500 гс). Замеры микротвердости проводились от внешней стенки образца трубы ко внутренней.

Для исследования микроструктурных составляющих применялся микроскоп C. Zeiss Observer D1m, оснащенный программным комплексом Thixomet PRO. Для травления образцов труб из стали 3сп использовали 5 %-ый раствор азотистой кислоты в спирте, для выявления структуры стали 12X18H101 использовали 20 %-ый раствор соляной кислоты в воде. Определение величины размеров зерна проводилось методом измерения длины хорд согласно ГОСТ 5639 – 82.

Для определения механических свойств деформированной заготовки были проведены испытания на разрывной машине УТС 110М-50 согласно ГОСТ 1397 – 84. Из заготовки трубы 89×4 мм стали 3сп были вырезаны три образца. Один из прямого участка (эталон) и два других – участка, подвергнутого деформации (раскат-

ке) на внешней и внутренней сторонах трубы. Процесс резания осуществляли на фрезерном станке с применением охлаждающей жидкости для сохранения физико-механических свойств экспериментальных образцов.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Из графиков, представленных на рис. 2, следует, что произошло повышение значений микротвердости у образцов труб, гнутых методом раскатывания. Среднее значение микротвердости для недеформированного участка образца стали 3сп составило 177,2 HV, тогда как у деформированных образцов среднее значение микротвердости 220,8 HV. Повышение твердости исследуемых образцов после гибки раскатыванием составило порядка 24 %. Согласно значениям, представленным на рис. 2, б, среднее значение микротвердости для недеформированного участка трубы из стали 12Х18Н10Т составило 249,87 HV, тогда как у деформированных образцов – 301,62 HV. Повышение твердости исследуемых образцов после гибки раскатыванием составило порядка 20,1 %. Среди деформированных образцов

прослеживается тенденция к повышению твердости по мере приближения к внутренней части образца.

Микроструктура образцов до деформации для стали 3сп представлена феррито-перлитной смесью, для стали 12Х18Н10Т – аустенитным зерном. В результате деформации структура образцов из стали 12Х18Н10Т трансформировалась в мартенсит с остаточным аустенитом, замер структурных составляющих которого не возможен из-за разрешающей способности исследовательского оборудования. На рис. 3 приведены структуры образцов до и после деформации раскатыванием. Заметно дробление структуры и уменьшение диаметральных размеров зерна.

Результаты испытаний образцов на разрывной машине и размеров структурных составляющих сведены в таблицу. Анализ результатов механических испытаний показывает рост значений пределов прочности на 21,5 % и пластичности на 16 % для стали 3сп. Для стали 12Х18Н10Т пластичность возрасла на 60 %, а прочность снизилась на 3,5 %. Коэффициент удлинения образцов из стали обеих марок снизился на 58,5 и 77,25 % соответственно.

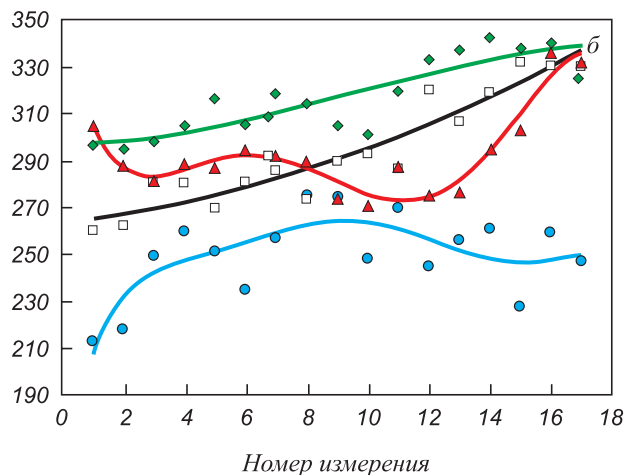
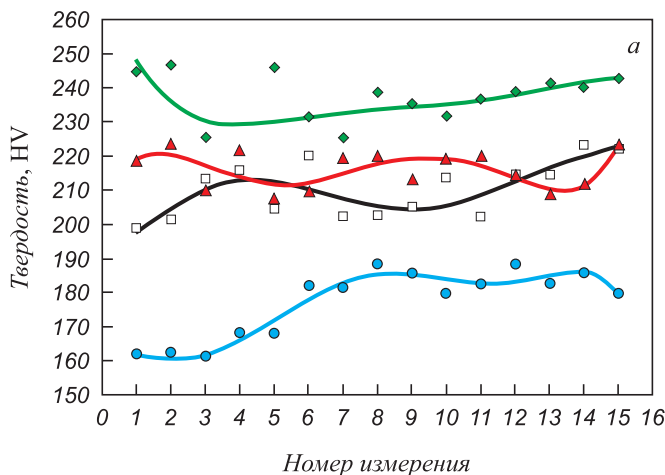


Рис. 2. Значения микротвердости кольцевых образцов трубы стали 3сп (а) и 12Х18Н10Т (б):
 ◆, □ и ▲ – внешний, средний и внутренний участки образца; ● – участок без деформации

Fig. 2. Values of microhardness of annular pipe samples of 3sp (a) and of 12Kh18N10T (б):
 ◆, □ and ▲ - outer, middle and inner sections of the sample; ● – area without deformation

Размер структурных составляющих и механические свойства образцов

Size of structural components and mechanical properties of the samples

Параметр	Образец стали 3сп			Образец стали 12Х18Н10Т		
	Эталон	С внутренней стенки изогнутой трубы	С наружной стенки изогнутой трубы	Эталон	С внутренней стенки изогнутой трубы	С наружной стенки изогнутой трубы
Балл зерна	9,44	10,80	10,05	8,51	*	*
$\sigma_{0,2}$, МПа	378,64	460,91	459,77	348,40	518,73	591,20
σ_b , МПа	468,04	534,93	580,10	973,00	923,00	955,60
δ , %	31,97	18,20	9,00	32,00	5,00	9,50

* – используемая методика не позволяет определять размер структурных составляющих мартенситной структуры.

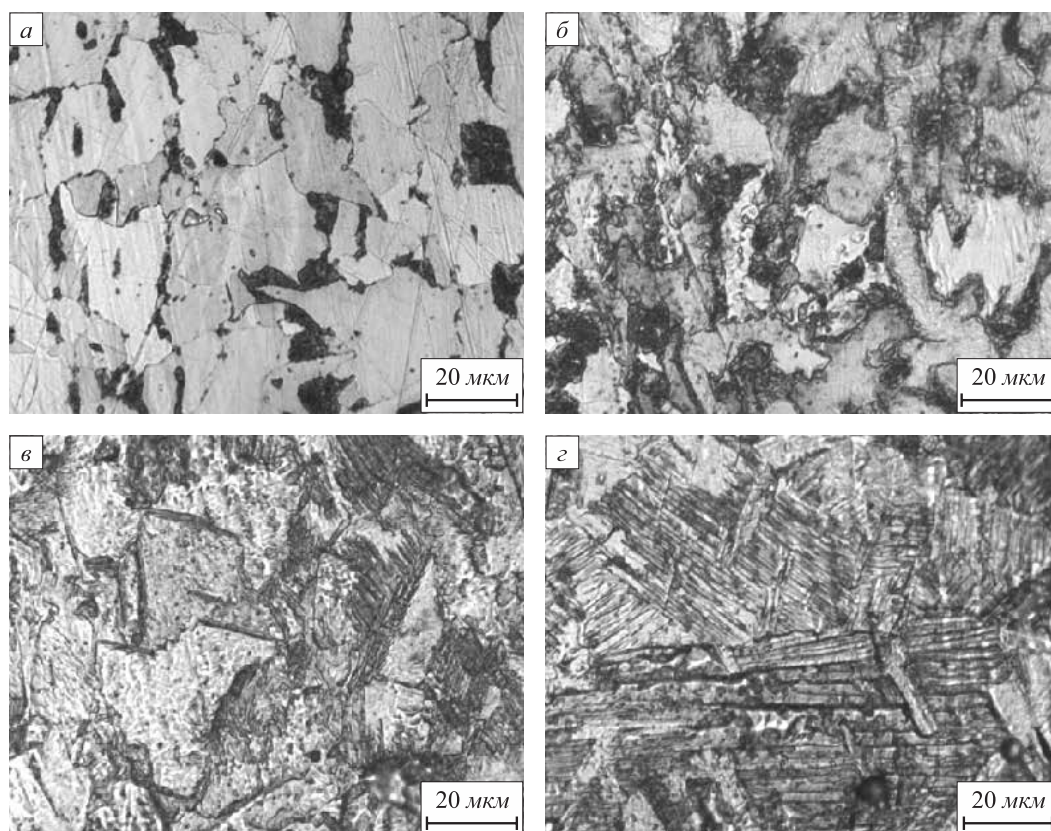


Рис. 3. Микроструктура образцов стали марки 3сп до деформации (а) и после (б) и стали 12Х18Н10Т до деформации (в) и после (з)

Fig. 3. Microstructure of 3sp steel samples before (a) and after (b) deformation and microstructure of 12Kh18N10T steel sample before (v) and after (z) deformation

Выводы

Представленный в работе метод деформации труб позволяет получить радиальный изгиб заготовки, не приводя к ее разрушению и не вызывая явных дефектов поверхности и микроструктуры. Процесс деформации труб методом раскатки приводит к повышению механических свойств испытуемых материалов. Повышение значений микротвердости, прочности и пластичности объясняется измельчением структуры за счет наклепа, что подтверждает и уменьшение балла зерна. В процессе деформации возможно изменение структуры материала. Анализ образцов стали 12Х18Н10Т показал, что в деформированных образцах произошло изменение структуры – аустенитная перешла в мартенситную с остаточным аустенитом. Следовательно, температура в областигиба в процессе деформации превышает температуру перекристаллизации для стали 12Х18Н10Т (1030 – 1040 °С). При термомеханическом способе деформации пластическое течение металла предполагает возможное изменение структуры стенок трубы в результате перекристаллизации и термической обработки материала областигиба, что требует более детального изучения и более глубокого анализа такой технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тавастшерна Р.И. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов. – М.: Книга по требованию, 2012. – 288 с.
2. Mandal A., Syed B., Bhandari K. etc. Cold-bending of linepipe steel plate to pipe, detrimental or beneficial? // *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 746. No. 2. P. 58 – 72.
3. Li J., Zhou C., Cui P., He X. Plastic limit loads for pipe bends under combined bending and torsion moment // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 92. No. 3. P. 133 – 145.
4. Iwamoto T., Kanie S. Evaluation of bending behavior of flexible pipe using digital image processing // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 171. No. 12. P. 1272 – 1278.
5. Гальперин А.И. Машины и оборудование для гибки труб. – М.: Недра, 1983. – 203 с.
6. Yuan L., Kyriakides S. Plastic bifurcation buckling of lined pipe under bending // *European Journal of Mechanics*. 2014. Vol. 47. No. 9. P. 288 – 297.
7. Sasidharan S., Arunachalam V., Subramaniam S. Ramifications of structural deformations on collapse loads of critically cracked pipe bends under in-plane bending and internal pressure // *Nuclear Engineering and Technology*. 2017. Vol. 49. P. 254 – 266.
8. Shim D., Kim K., Lee K. Double-stage forming using critical pre-bending radius in roll bending of pipe with rectangular cross-section // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 236. No. 10. P. 189 – 203.
9. А.с. 566649 СССР. Рогообразный сердечник для изготовления из трубных заготовок отводов с центральным углом не более 90 градусов / А.И. Киямов // *Открытия. Изобретения*. 1977. Бюл. № 28.

10. Bae W., Chang K., Lee C. Progressive inelastic deformation of a girth-welded stainless steel pipe under internal pressure and cyclic bending // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 128. No. 12. P. 81 – 93
11. Крикун В.Я. Трубогибочные работы на строительстве трубопроводов. – М.: Недра, 1978. – 208 с.
12. Kim Y., Lee K., Oh C. etc. Effect of bend angle on plastic loads of pipe bends under internal pressure and in-plane bending // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2007. Vol. 49. No. 12. P. 1413 – 1424.
13. А.с. 427759 СССР. Способ гибки труб с пропусканьем тока высокой плотности / В.А. Бубнов, В.А. Овчинников // *Открытия. Изобретения*. 1974. Бюл. № 18.
14. Hayashi A., Terada Y., Kanie S. Development of pipe-in-pipe filled with granular material for flexible and ductile bending performance // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 95. P. 232 – 240.
15. Ефимов О.Ю., Чинокалов В.Я., Юрьев А.Б. и др. Закономерности и механизмы формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств балочного профиля при ускоренном охлаждении двутавра // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 4. С. 16 – 19.
16. Костерев В.Б., Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф. и др. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний при термомеханическом упрочнении // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 4. С. 24 – 27.
17. Узлов И.Г., Сидоренко О.Г., Федорова И.П. и др. Новое в технологии управления процессом термического упрочнения арматурного проката // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 1. С. 89 – 91.
18. Сарычев В.Д., Громов В.Е., Невский С.А. и др. Формирование нанослоев за счет развития гидродинамических неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. № 10. С. 679 – 687.
19. Tang N. Plastic-deformation analysis in tube bending // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000. Vol. 77. No. 9. P. 751 – 759.
20. Li H., Mackenzie D. Characterising plastic collapse of pipe bend structures // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2006. Vol. 83. P. 85 – 95.
21. Gavriilidis I., Karamanos S. Bending and buckling of internally-pressurized steel lined pipes // *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 171. No. 1. P. 540 – 553.
22. Пат. 818707 РФ МКИ В 21D 9/14. Способ гибки труб / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич. Оpubл. 07.04.81. Бюл. № 13.
23. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В., Бобылев А.В. Эффект снижения усилия при гибке труб, раскатываемых с большими натягами, и механизм его проявления. – В кн.: *Прогрессивная технология чистой и отделочной обработки*. – Челябинск: изд. ЧГТУ, 1995. – 183 с.
24. Козлов А.В., Бобылев А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2007. – 169 с.

Поступила в редакцию 27 июня 2019 г.

После доработки 15 августа 2019 г.

Принята к публикации 22 августа 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 10, pp. 816–821.

CHANGES IN PIPE GEOMETRY DURING SEQUENTIAL CREATION OF STRESSES ON THE INNER SURFACE UNDER EXTERNAL THERMOMECHANICAL EFFECTS

I.V. Chumanov, A.V. Kozlov, M.A. Matveeva

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-816-821

Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

REFERENCES

- Abstract.** In modern high-tech industry, flexible pipe technology is widely used. Pipe benders are an integral part of pipeline systems. The most widely used are methods of pipes cold bending, which are accompanied by a number of negative phenomena – such as reduction in the crackle of the wall on outer side of the bend, ovalization of the cross section and formation of bumps. The article presents a study of influence of deformation technology of pipe billets by rolling with high tension on the structure and properties of the billet's material. The method of pipe deformation by rolling with tension allows obtaining radial bending of the billet without its destruction and without causing obvious defects of the surface and microstructure. The tests were carried out on the samples from steel of 3sp and 12Kh18N10T grades. Research of the microstructure was performed in accordance with GOST 5639 – 82, of mechanical properties – with GOST 1397 – 84, of microhardness – with GOST 9450 – 76. The article examines the effect of changes in geometry of the pipe billet on its structure and properties. The process of pipe deformation by rolling leads to changes in the mechanical properties of the tested materials. The values of microhardness and strength increase, while the grain points decrease. In the process of deformation, it is possible to change the microstructure of the material as a result of structural transformations (quenching). In the thermomechanical method of deformation, plastic flow of metal suggests possible change in structure of pipe walls as a result of recrystallization and heat treatment of material of the bend area. Therefore, it requires further study and more in-depth analysis of this technology.
- Keywords:** pipe billet, rolling, pipe bender, deformation, microhardness, mechanical properties, microstructure.
1. Tavastsherna R.I. *Izgotovlenie i montazh tekhnologicheskikh truboprovodov* [Production and installation of technological pipelines]. Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2012, 288 p. (In Russ.).
 2. Mandal A., Syed B., Bhandari K., Bhattacharya B. etc. Cold-bending of linepipe steel plate to pipe, detrimental or beneficial? *Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 746, no. 2, pp. 58–72.
 3. Li J., Zhou C., Cui P., He X. Plastic limit loads for pipe bends under combined bending and torsion moment. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015, vol. 92, no. 3, pp. 133–145.
 4. Iwamoto T., Kanie S. Evaluation of bending behavior of flexible pipe using digital image processing. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 171, no. 12, pp. 1272–1278.
 5. Gal'perin A.I. *Mashiny i oborudovanie dlya gibki trub* [Machines and equipment for pipe bending]. Moscow: Nedra, 1983, 203 p. (In Russ.).
 6. Yuan L., Kyriakides S. Plastic bifurcation buckling of lined pipe under bending. *European Journal of Mechanics*. 2014, vol. 47, no. 9, pp. 288–297.
 7. Sasidharan S., Arunachalam V., Subramaniam S. Ramifications of structural deformations on collapse loads of critically cracked pipe bends under in-plane bending and internal pressure. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017, vol. 49, pp. 254–266.
 8. Shim D., Kim K., Lee K. Double-stage forming using critical pre-bending radius in roll bending of pipe with rectangular cross-section. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, vol. 236, pp. 189–203.
 9. Kiyamov A.I. *Rogoobraznyi serdechnik dlya izgotovleniya iz trubnykh zagotovok otvodov s tsentral'nym uglom ne bolee 90 gradusov* [Horn-shaped core for production of branches with a central angle

- no more than 90 degrees from pipe billets]. Certificate of authorship USSR no. 566649. *Otkrytiya. Izobreteniya*. 1977, no. 28. (In Russ.).
10. Bae W., Chang K., Lee C. Progressive inelastic deformation of a girth-welded stainless steel pipe under internal pressure and cyclic bending. *Ocean Engineering*. 2016, vol. 128, no. 12, pp. 81–93.
 11. Krikun V.Ya. *Trubogibochnye raboty na stroitel'stve truboprovodov* [Pipe bending works at pipeline building]. Moscow: Nedra, 1978, 208 p. (In Russ.).
 12. Kim Y., Lee K., Oh C. etc. Effect of bend angle on plastic loads of pipe bends under internal pressure and in-plane bending. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2007, vol. 49, no. 12, pp. 1413–1424.
 13. Bubnov V.A., Ovchinnikov V.A. *Sposob gibki trub s propuskaniem toka vysokoi plotnosti* [Method of pipes bending with transmission of high density current]. Certificate of authorship USSR no. 427759. *Otkrytiya. Izobreteniya*. 1974, no. 18. (In Russ.).
 14. Hayashi A., Terada Y., Kanie S. Development of pipe-in-pipe filled with granular material for flexible and ductile bending performance. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 95, pp. 232–240.
 15. Efimov O.Yu., Chinokalov V.Ya, Yur'ev A.B. etc. Structure-phase states and mechanical properties formation regularities at accelerated cooling of parallel flange beam. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 4, pp. 16–19. (In Russ.).
 16. Kosterev V.B., Efimov O.Yu., Ivanov Yu.F. etc. Formation regularities of gradient structure-phase states at strengthening by heat- and mechanical treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 4, pp. 24–27. (In Russ.).
 17. Uzlov I.G., Sidorenko O.G., Fedorova I.P. etc. New tendencies in control technology of thermal hardening of reinforcing bars. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2008, no. 1, pp. 89–91. (In Russ.).
 18. Sarychev V.D., Gromov V.E., Nevskii S.A. etc. Nanolayers formation at hydrodynamic instability development under the external energy effects. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 10, pp. 679–687. (In Russ.).
 19. Tang N. Plastic-deformation analysis in tube bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000, vol. 77, no. 9, pp. 751–759.
 20. Li H., Mackenzie D. Characterizing plastic collapse of pipe bend structures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2006, vol. 83, pp. 85–95.
 21. Gavriilidis I., Karamanos S. Bending and buckling of internally-pressurized steel lined pipes. *Ocean Engineering*. 2019, vol. 171, no. 1, pp. 540–553.
 22. Lakirev S.G., Khil'kevich Ya.M. *Sposob gibki trub* [Method of pipes bending]. Patent no. 818707 RF MKI V 21D 9/14. *Bulleten' izobretenii*. 1981, no. 13. (In Russ.).
 23. Lakirev S.G., Khil'kevich Ya.M., Kozlov A.V., Bobilev A.V. Effect of effort reduction at bending of pipes rolled with high tension and mechanism of its manifestation. In: *Progressivnaya tekhnologiya chistovoi i odelochnoi obrabotki* [Advanced technology of emerying and finishing treatment]. Chelyabinsk: izd. ChGTU, 1995, 183 p. (In Russ.).
 24. Kozlov A.V., Bobilev A.V. *Tekhnologiya i oborudovanie kholodnoi gibki tonkostennykh trub: monografiya* [Technology and equipment of cold bending of thin-walled pipes: Monograph]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2007, 169 p. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 11.9658.2017/8.9).
- Information about the authors:**
- I.V. Chumanov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (chumanoviv@susu.ru)
- A.V. Kozlov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering Technology and Machine Tools (kozlovav@susu.ru)
- M.A. Matveeva**, Assistant of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (matveevama@susu.ru)

Received June 27, 2019
 Revised August 15, 2019
 Accepted August 22, 2019