

УДК 621.774

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-87-97>

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С РАСКАТЫВАНИЕМ

Бобылев А.В., Козлов А.В., Максимов С.П., Халиулин Е.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация

Тонкостенные трубы из коррозионностойких сталей находят широкое применение в авиации, ракетостроении, космической технике, судостроении, машиностроении, черной и цветной металлургии, атомной энергетике, химической, нефтяной и газовой промышленности и других отраслях. Гибка труб является одной из основных операций технологического процесса изготовления деталей трубопроводов. При гибке труб с раскатыванием тепловые явления определяют температуру в зоне гибки, определяют интенсивность износа инструмента (раскатных шариков), следовательно, и его стойкость. С целью установления процесса распределения теплоты в зоне гибки, были проведены натурные эксперименты с применением искусственной термопары и тепловизора. Применение искусственной термопары объясняется его простотой, надежностью и широкой доступностью. Все необходимые измерения были проведены на специальном станке для гибки труб малого диаметра. Была произведена съемка температур с применением тепловизора. Эксперименты были проведены с применением охлаждающей жидкости и без нее. Для получения пространственной картины распределения тепла в зоне обработки и построения зависимости температуры от времени и фаз гибки, были проведены измерения промышленным тепловизором FLIR P65 на разработанном в ЮУрГУ специальном станке модели СХГТ–3. Были построены графические зависимости изменения температуры в зоне раскатывания при равномерном прохождении по 10 точкам. Было проведено сравнение двух методов измерения температуры. Была измерена температура в зоне раскатывания без использования охлаждения, также была измерена температура на поверхности трубы, которая заметно отличается от температуры на раскатном инструменте, из-за рассеяния теплоты по различным элементам технологической системы, заготовки и окружающей среде. В ходе исследования стало известно, что при значительном периоде обработки возрастает вероятность низкотемпературного отпуска инструмента, что требует обязательного использования высокоэффективных охлаждающих сред.

Ключевые слова: тепловые явления, гибка труб, специальный станок, искусственная термопара, тепловизор.

Введение

Для рациональной компоновки трубопроводов, организации компенсаторов температурных деформаций и других технологических элементов, изготавливаемых из труб, требуется большое количество их криволинейных участков. Гибка труб является одной из основных операций технологического процесса изготовления изогнутых деталей трубопроводов. Однако в современных производственных условиях осуществить качественную гибку труб диаметром более 40 мм в холодном состоянии достаточно сложно. Связано это с тем, что она сопровождается возникновением таких дефектов, как утонение стенки на внешней частигиба, сплющивание поперечного сечения, образование гофр и изломов на внутренней частигиба.

Основным приемом снижения перечисленных негативных явлений при гибке и повышения пластических свойств материала трубы является нагрев. Однако его применение требует значительных энергозатрат и использования сложного дорогостоящего оборудования.

Разработанная в ЮУрГУ технология гибки тонкостенных труб с раскатыванием устраняет многие из перечисленных выше недостатков. Сущность новой технологии гибки труб с раскатыванием [1] заключается в следующем. При вращении раскатника (**рис. 1**), заведенного в трубу с достаточно большим натягом, в каждой точке кольцевой зоны раскатывания возникает знакопеременный изгиб, при котором изгибные напряжения кратковременно достигают предела текучести σ_T . В результате при приложении относительно небольшого изгибающего усилия происходит гибка в перемещающейся кольцевой зоне раскатывания [2–8].

© Бобылев А.В., Козлов А.В., Максимов С.П., Халиулин Е.В., 2018

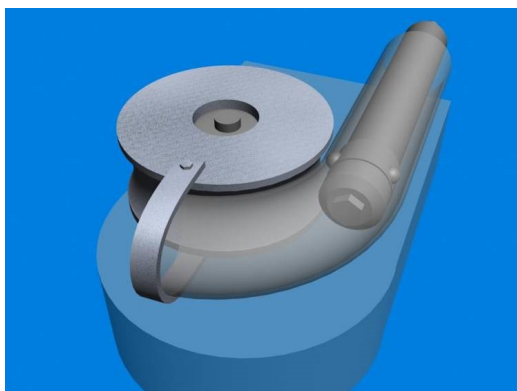
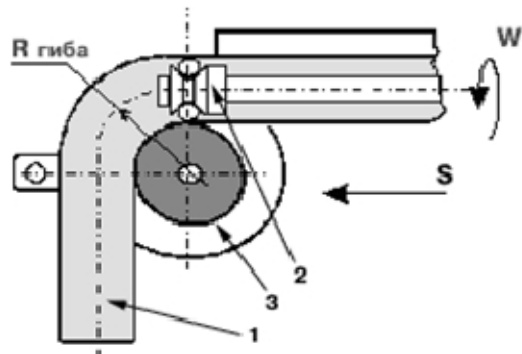


Рис. 1. Схема гибки труб с раскатыванием:
1 – труба; 2 – раскатной инструмент; 3 – гибочный ролик

Материалы и методы исследования

Тепловые явления в процессе раскатывания и гибки трубы играют исключительно важную роль. Именно они определяют температуру в зоне гибки, которая оказывает прямое влияние на величину сил гибки и микроструктуру поверхностного слоя заготовки. Еще более существенное влияние оказывает температура раскатывания на интенсивность износа инструмента (раскатных шариков), следовательно, и его стойкость. При повышении локальных температур в зоне раскатывания у раскатных шариков может произойти низкотемпературный отпуск, который изменит механические свойства шариков, чем заметно ускорит их износ [1, 22].

Для выявления характера распределения тепла в зоне раскатывания и величин нагрева рабочих элементов [9–13] проведена серия экспериментов с использованием следующих (двух концептуально разных) методов измерений: с помощью искусственной термопары и тепловизора [21].

Эксперименты с использованием искусственной термопары обусловлены его простотой, надёжностью и широкой доступностью. Из-

мерения проводились на демонстрационной установке [15–20] для гибки труб малого диаметра (рис. 2).

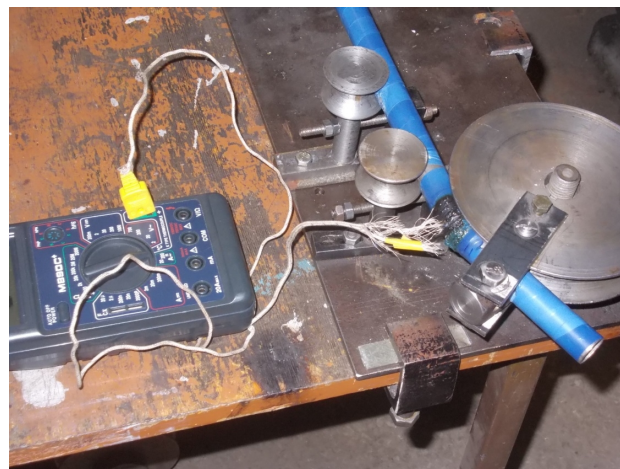


Рис. 2. Станок для гибки труб малого диаметра

В процессе гибки зона раскатывания равномерно проходила по 10 точкам, расположенным через 10 мм на поверхности трубы внешнего радиусагиба (точка Т2) и над осью раскатной головки, соответственно, и самой трубы (точка Т1, отклонённая от точки Т2 на 90°, рис. 3, где 1 – раскатной ролик, 2 – раскатная головка, 3 – заготовка, 4 – мультиметр, 5 – искусственные термопары).

Результаты исследований с помощью искусственной термопары и тепловизора

Для определения максимальной температуры гибки в первом опыте эксперимент проводился без применения охлаждения [14]. Его результаты приведены на рис. 4–6, где 1 – минеральное масло И10-А; 2 – вода; 3 – эмульсол МР-7.

Измерения термопарой позволили получить лишь приблизительную картину распределения тепла при гибке труб с раскатыванием. Кроме того, термопара хоть и незначительно, но удалена от зоны обработки и не дает реальной картины непосредственно в зоне работы инструмента.

Для получения пространственной картины распределения тепла в зоне обработки и построения зависимости температуры от времени и фаз гибки проведены измерения промышленным тепловизором FLIR P65 на станке марки СХГТ-3 при гибке трубы диаметром 76 мм и толщиной стенки 3,5 мм. Съёмка велась с 2-х позиций: 1) перпендикулярно оси вращения раскатки; 2) вдоль оси работы инструмента, со стороны открытого торца трубы. Опыты проводились и при использовании различных сред обработки – с использованием охлаждающей жидкости и без нее (рис. 7).

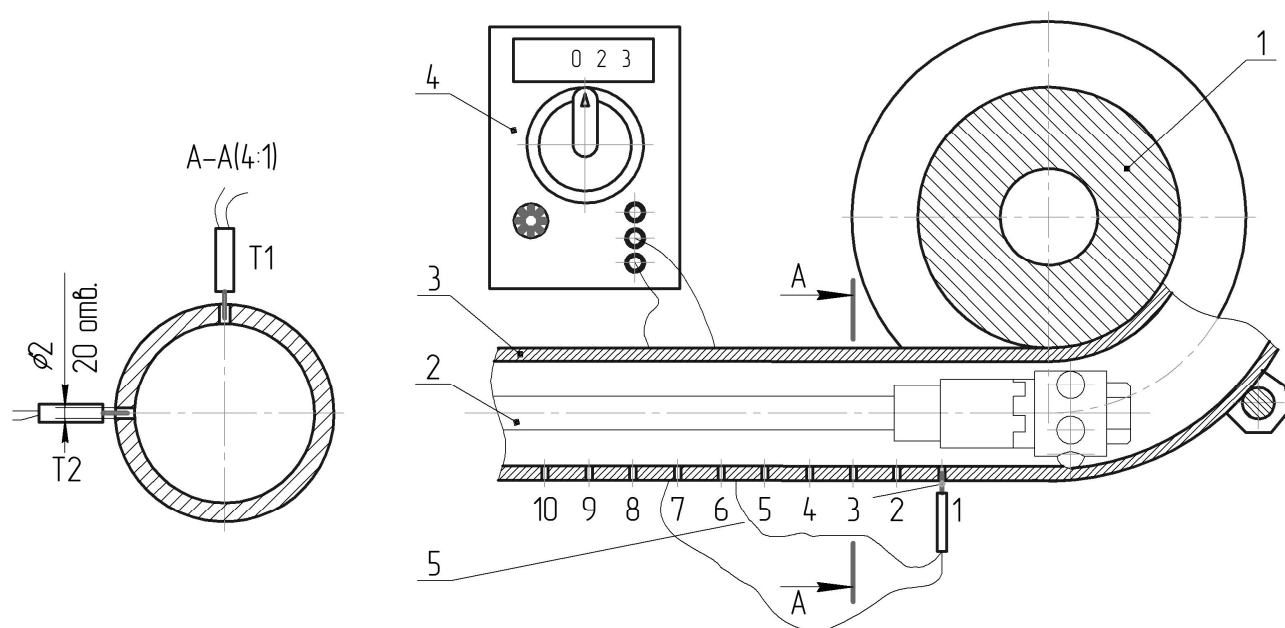


Рис. 3. Схема измерения

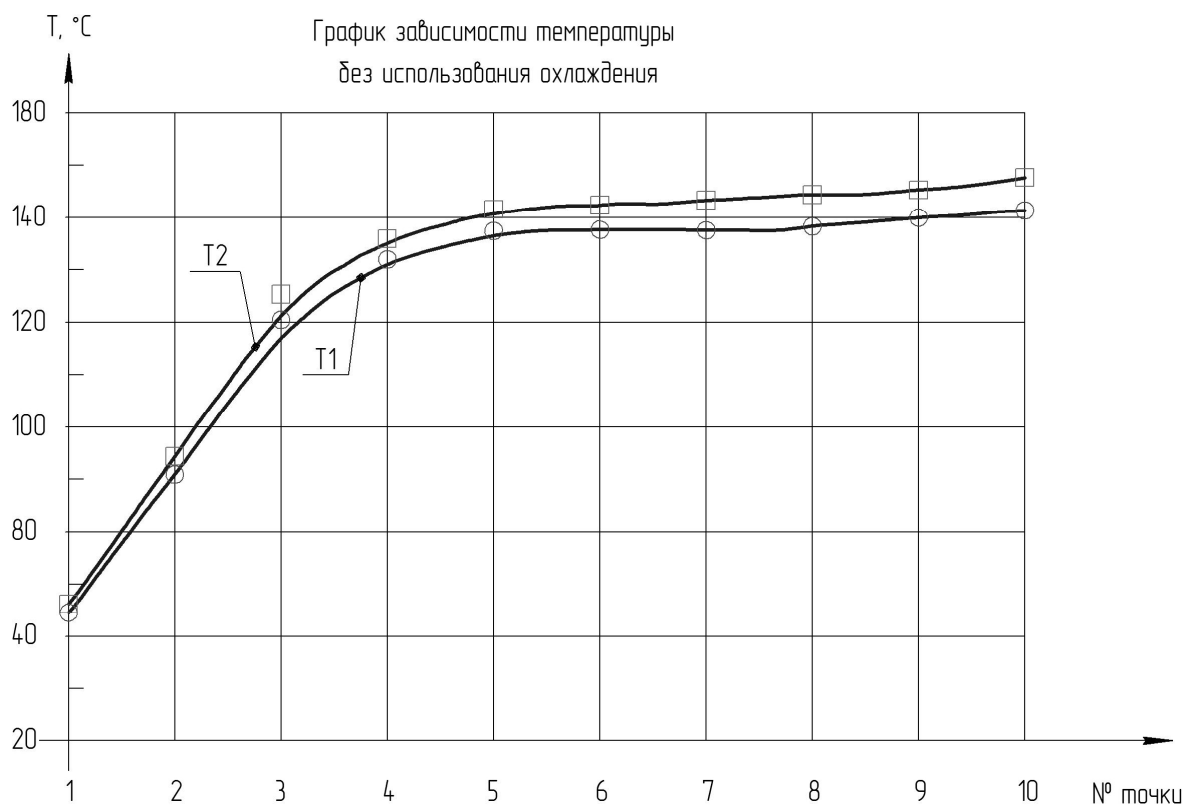


Рис. 4. Результаты измерения с помощью искусственных термопар без применения охлаждения

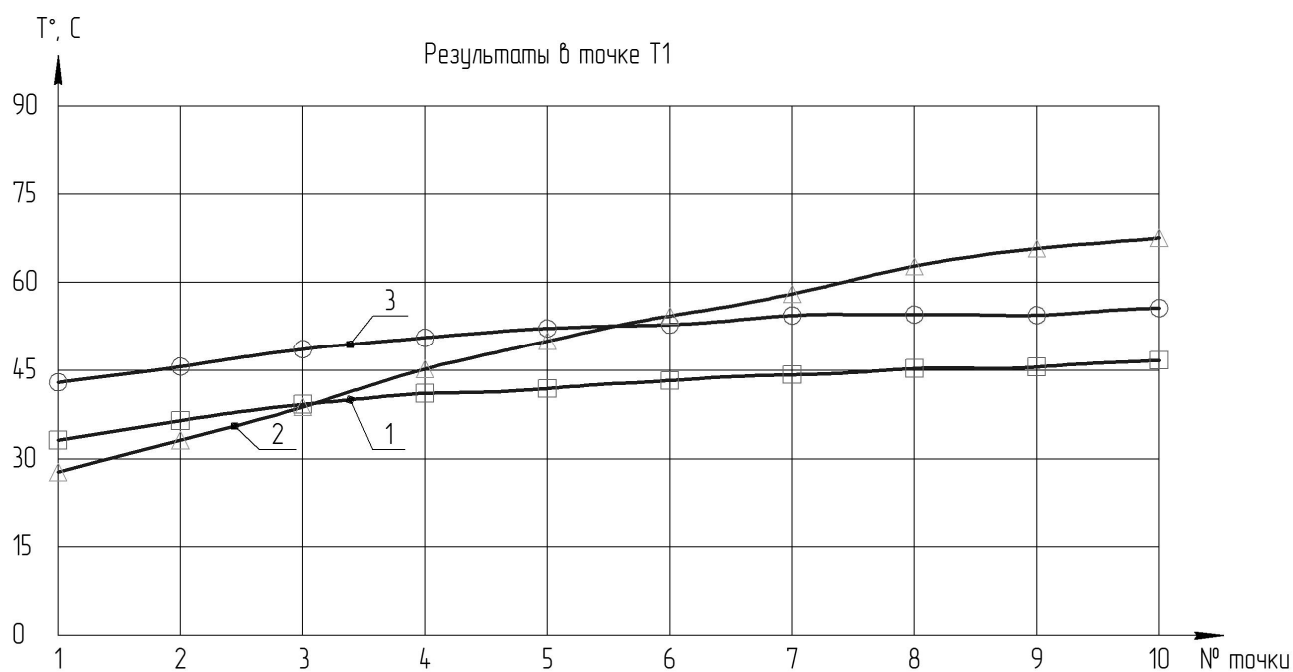


Рис. 5. График изменения температуры в зоне раскатывания (T1) с применением различных типов охлаждения

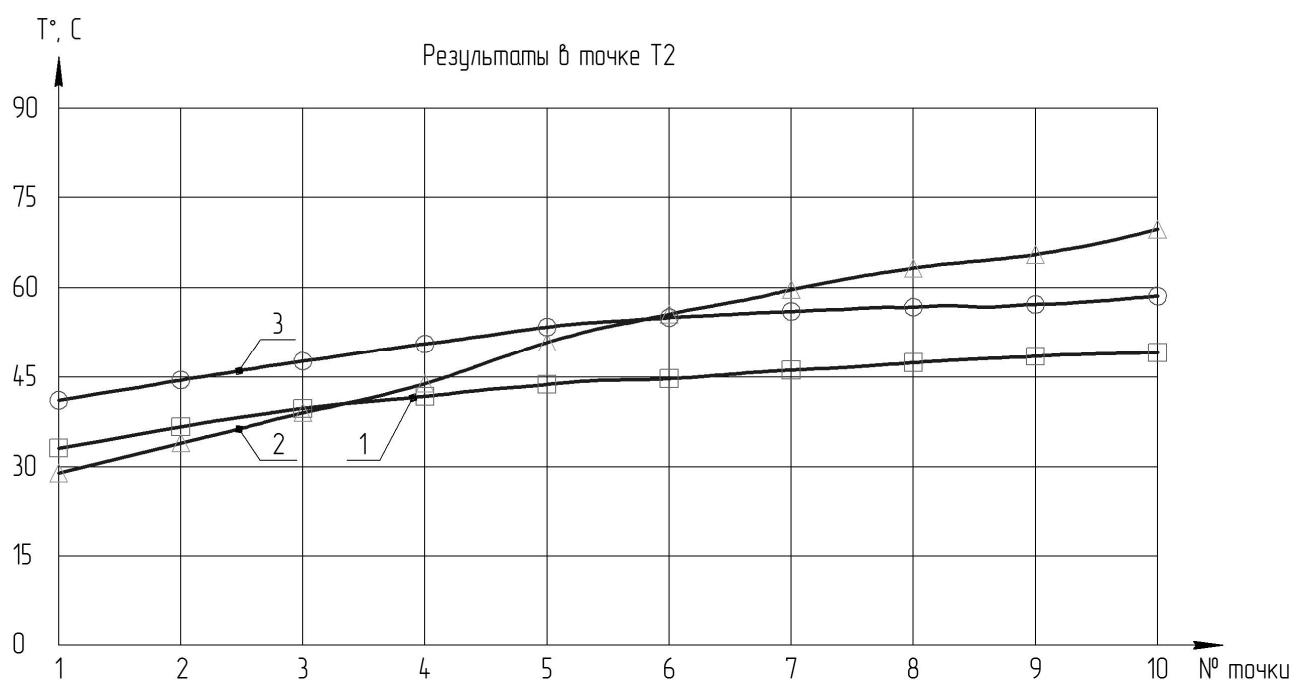


Рис. 6. График изменения температуры в зоне раскатывания (T2) с применением различных типов охлаждения

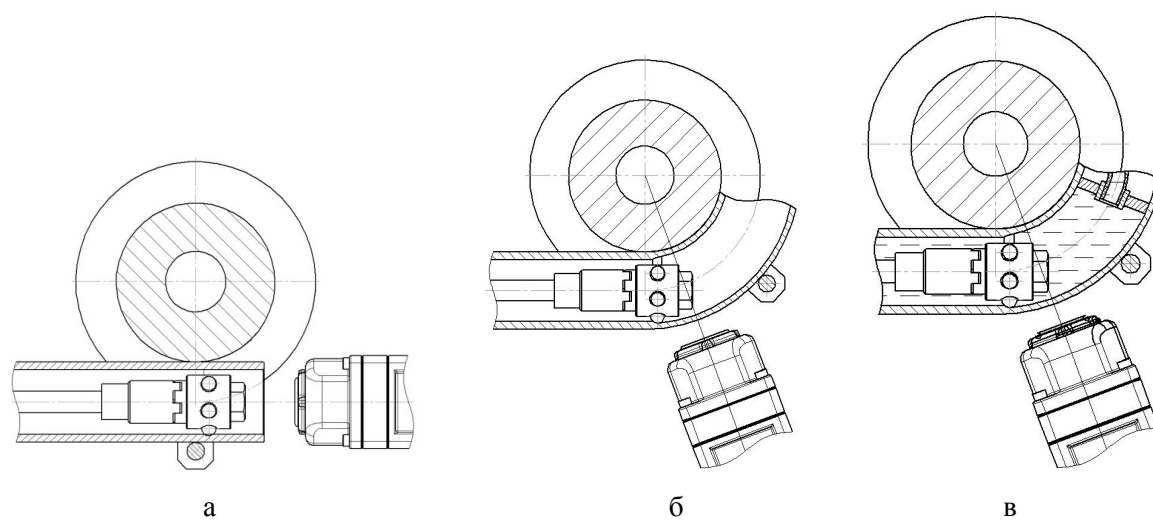


Рис. 7. Схема съёмки температур с помощью тепловизора:
а – с торца, без охлаждения; б – со стороны зоны раскатывания, без охлаждения;
в – со стороны зоны раскатывания, с использованием воды в качестве охлаждения

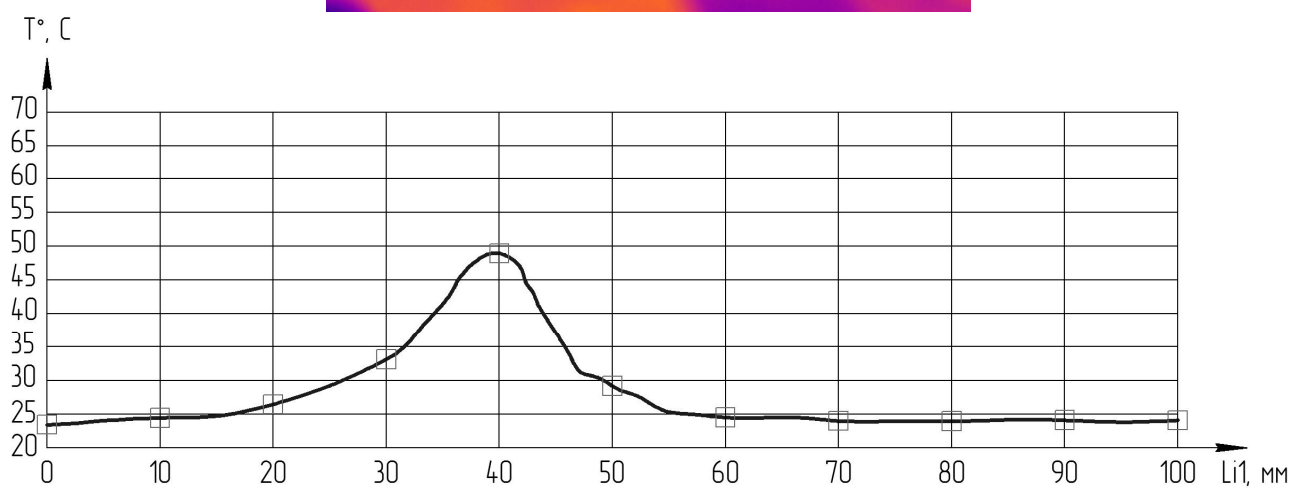
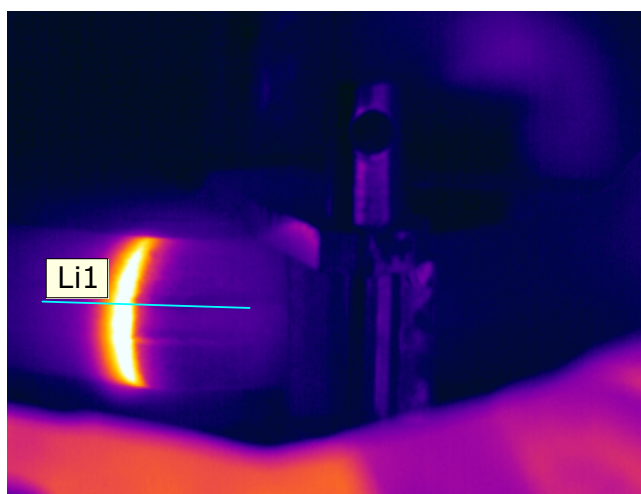


Рис. 8. Распределение температуры в зоне раскатывания без применения охлаждения, в момент включения

Результаты измерений представлены на **рис. 8–11**.

На **рис. 8** видно, что на линии 1 (Li1) вначале температура трубы равна температуре окружающей среды, т.е. $23,7^{\circ}\text{C}$, нет яркого свечения на трубе на расстоянии 20 мм, затем в пределах зоны раскатывания на расстоянии 30 мм (яркая полоса на трубе) температура постепенно возрастает, достигая максимума $47,7^{\circ}\text{C}$, согласно графику, затем температура трубы уменьшается и на расстоянии 50 мм от зоны раскатывания стабилизируется до $23,7^{\circ}\text{C}$, т.е. до температуры окружающей среды.

На **рис. 9** видно, что в начальный момент температура на внутренней поверхности трубы практически равна температуре окружающей среды ($21,3^{\circ}\text{C}$ для линии 1 и $20,9^{\circ}\text{C}$ для линии 2), затем в месте контакта деформирующих элементов с трубой температура постепенно увеличивается. Скачки на графике обусловлены тем, что шарики на раскатном инструменте проскальзывают во время гибки, то увеличивая, то умень-

шая температуру, что обусловлено разными радиусами трубы и конусов раскатного инструмента, на котором расположены деформирующие элементы (шарики).

Последующие измерения температуры произведены через 30 с после начала гибки, когда процесс стабилизировался (уголгиба составил 10° – 15°).

На **рис. 10** видно, что максимальная температура наблюдается в середине полосы шириной 50 мм и достигает 130° – 140°C . По краям температура уменьшается до 30° – 40°C . Однако не доходя до температуры окружающей среды, т.к. зона раскатывания еще не успевает остыть.

На **рис. 11** видно, что характер распределения температуры примерно такой же, как в начальный момент, максимальная температура на инструменте достигает 130° – 140°C .

Графики сравнения результатов измерений с охлаждением водой и без применения охлаждения приведены на **рис. 12–13**.

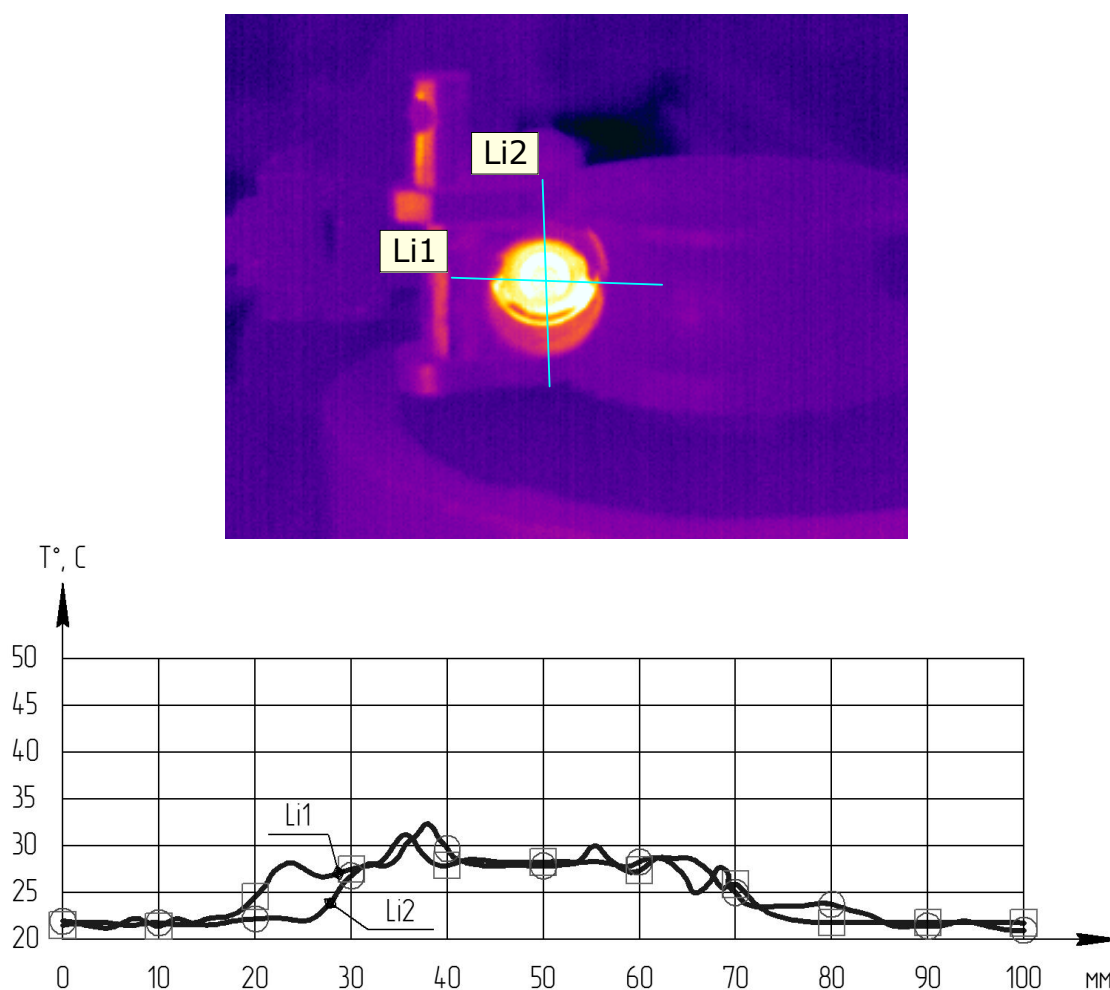


Рис. 9. Распределение температуры на раскатном инструменте, в момент включения

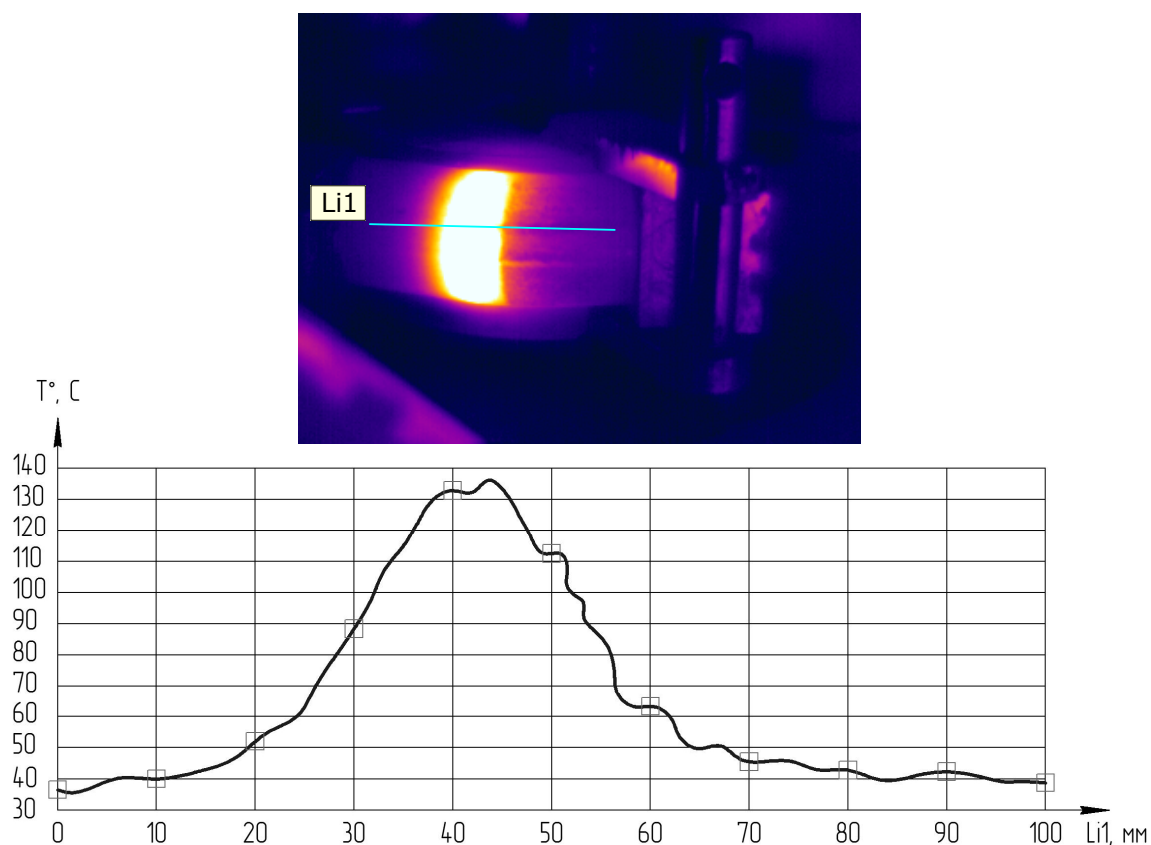


Рис. 10. Распределение температуры в зоне раскатывания без охлаждения, через 30 с после включения

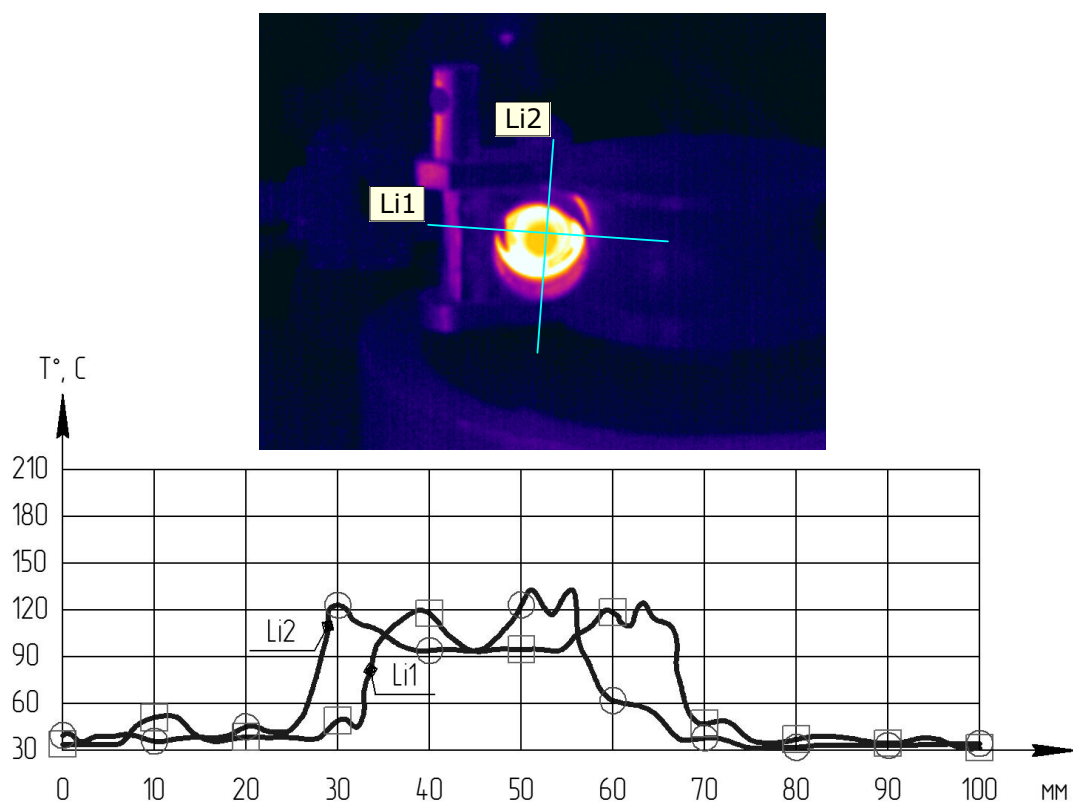


Рис. 11. Распределение температуры на раскатном инструменте, через 30 с после включения

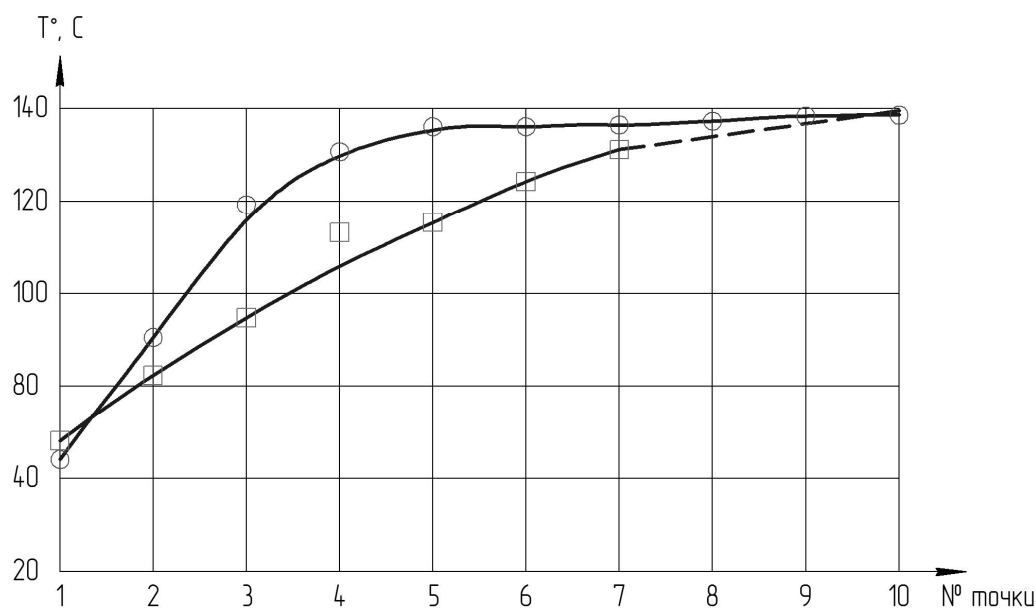


Рис. 12. График сравнения результатов измерений без применения охлаждения

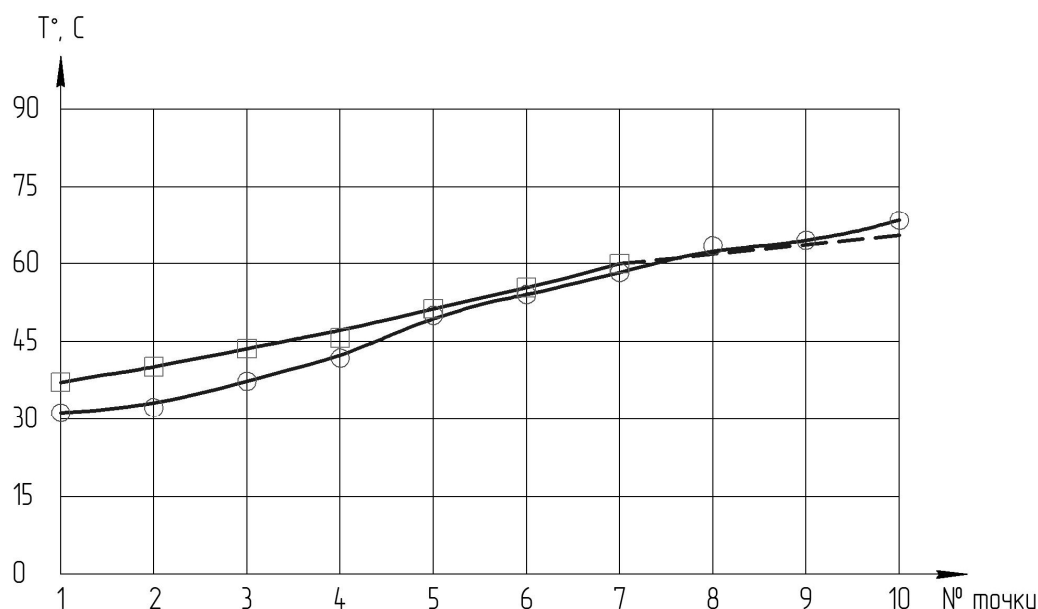


Рис. 13. График сравнения результатов измерений с охлаждением водой

Заключение

Сравнивая результаты двух методов измерения, представленных на **рис. 12–13**, можно сделать следующие выводы:

1) без использования охлаждения температура в зоне раскатывания повышается не столь значительно в начале из-за перераспределения теплоты по толщине трубы;

2) температура на поверхности трубы заметно отличается от температуры на раскатном инструменте, что видно на снимках с торца трубы из-за

рассеяния теплоты по элементам технологической системы заготовки и распределения теплоты в окружающую среду;

3) при значительной длительности гибки трубы в зоне раскатывания возрастает вероятность низкотемпературного отпуска инструмента, что требует обязательного использования высокоэффективных охлаждающих сред;

4) при выходе на рабочий режим гибки (**рис. 10–11**) температура достигает 130–140°C. Перепад температуры между раскатным инструментом и трубой 40°C. Применение в качестве охлаждения

воды является достаточным, чтобы сохранить стойкость раскатного инструмента.

Список литературы

1. Козлов А.В., Бобылев А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография. Челябинск: ЮУрГУ, 2007. 169 с.
2. Solomonov, K., 2014, Development of software for simulation of forming forgings, *Procedia Engineering*, 8. P. 437–443.
3. Хлуд А.А. Обкатывание роликами наружных и раскатывание шариками внутренних поверхностей. Размерно-числовая и упрочняющая обработка деталей давлением. М.: Машиностроение, 1963. С. 144–160.
4. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. М.; Л.: Машгиз, 1961. 463 с.
5. LS-DYNA Theoretical Manual. Compiled By John O. Hallquist. 1998. 498 с.
6. Herrmann, M. State-of-the-Art in Process Simulation of Forming Processes / M. Herrmann, M. Fiderer, J. Walters // *Papers of the International Conference "New Developments in Forging Technology"* in Fellbach (near Stuttgart). Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2005. 68 с.
7. Kozlov, A. The technology and equipment for cold bending of pipes / A. Kozlov, Y. Khilkevich // *The 29th International Conference on Mechanical Engineering: Book of Conference Lecturer*. Haifa, Israel: Technion, 2003. С. 190–192.
8. Kozlov, A.V. Stress state in pipe on flexure with internal shairing / Kozlov A.V., Sherkunov V.G., Kyilceovich Ya.M. *Russian Engineering Reseach*. New York: Allerton Press, Inc., 2009. Т. 29, № 8. С. 809–812.
9. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // *Key Engineering Materials*. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.
10. Халиулин Е.В., Козлов А.В. Измерение температуры при гибке труб с раскатыванием с использованием термопары. Вестник УГАТУ. Серия «Машиностроение». Уфа: Изд-во УГАТУ, 2014. Т. 18. № 3(64). С. 93–96.
11. Banabic D, Bunge H.J., Pohlandt K. and Tekkaya A.E. (2000), *Formability Of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits*, Springer, Berlin, Germany.
12. Hosford W.F. *Mechanical Behavior of Materials*. New-York, Cambridge University Press. 2005.
13. Ling K., Liu Y.-K. Study on forming process of the oil pipe with upset ends // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 456. P. 648–651.
14. Вейлер С.Я., Лихтман В.И. Действие смазок при обработке металлов давлением. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 232 с.
15. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process // *Petrochemical Equipment*. 2015. Vol. 44. P. 58–63.
16. Козлов А.В., Бобылев А.В. О возможности холодной гибки труб из нержавеющей и титановых сплавов // *Отраслевые аспекты технических наук*. 2012. С. 6–10.
17. Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire // *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 7, July 2014, pp. 78–83.
18. Гайдамак К.М. Монтаж оборудования общего назначения и технологических трубопроводов. М.: Высш. шк., 1987. 255 с.
19. Тавастжерна, Р.И. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
20. Гальперин А.И. Машины и оборудование для гибки труб. М.: Машиностроение, 1983. 203 с.
21. Козлов А.В., Шеркунов В.Г. Компьютерное моделирование процесса гибки труб с раскатыванием // Вестник ТГУ. 2009. С. 11–15.
22. Yuri F. Kurmachev, Ruslan E. Sokolov, Denis S. Voroshilov, Vadim M. Bespalov, Vladimir V. Moscvichev. The analytical dependence of the filling billets value to a given relative degree of deformation during cold rolling of tubes // *Journal of Siberian Federal University*. 2012 5 (7), pp. 731–736.

Поступила 22.06.18

Принята в печать 02.08.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-87-97>

UNDERSTANDING THE THERMAL PHENOMENA OCCURING DURING PIPE BENDING AND ROLLING

Andrey V. Bobylev – PhD (Eng.), Head of the Department of Mechanical and Machine Tool Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: avbobylev@susu.ru

Aleksandr V. Kozlov – DSc (Eng.), Professor South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: a_kozlov55@mail.ru

Sergey P. Maksimov – PhD (Eng.), Dean of the Faculty of Machinery and Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: maximovsp@susu.ru

Evgeny V. Khaliulin – Engineer, Postgraduate Student South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract

Thin-walled pipes made of corrosion-resistant steels are widely used in aviation, rocket engineering, space technology, shipbuilding, machine building, ferrous and non-ferrous metallurgy, as well as nuclear power, chemical, oil and gas and other industries. Pipe bending is one of the key processes in the production of pipeline components. During pipe bending and rolling, thermal phenomena dictate the temperature in the bending zone, the wear rate of the tool (rolling balls), and hence its durability. To establish the heat distribution pattern in the bending zone, we conducted a series of natural experiments using an artificial thermocouple and a thermal imager. The artificial thermocouple was used because it is a simple, reliable, and easily available tool. All the necessary measurements were taken on a special pipe bending machine designed for small diameter pipes. All temperatures were recorded using a thermal imager. There were experiments carried out with and without a coolant. To obtain a spatial pattern of heat distribution in the treatment zone and to establish a relationship between the temperature and the bending time and phase, a series of measurements was taken with the industrial thermal imager FLIR P65 on a custom-built machine of the SKhGT-3 model designed at SUSU. Curves were built showing the temperature variations in the rolling zone when 10 points are covered in one time. A comparison was made of two temperature measuring techniques. Temperature was measured in the rolling zone with no coolant used, and temperature was measured at the pipe surface, which noticeably differs from the temperature on the rolling tool due to heat dissipation across various components of the process system, the workpiece and the environment. The study found that an extended processing period makes the effect of low-temperature tempering of the tool more probable, which makes the use of highly effective cooling agents a pre-requisite condition.

Keywords: Thermal phenomena, pipe bending, custom-built machine, artificial thermocouple, thermal imager.

References

1. Kozlov A.V., Bobylev A.V. *Tekhnologiya i oborudovanie khodnoy gibki tonkostennyykh trub: monografiya* [Technology and equipment for cold bending of thin-walled pipes: Monograph]. Chelyabinsk: SUSU, 2007, 169 p. (In Russ.)
2. Solomonov, K., 2014, Development of software for simulation of forming forgings, *Procedia Engineering*, 8. P. 437–443.
3. Khlud A.A. Obkатыvanie rolkami naruzhnykh i raskatyvanie sharikami vnutrennykh poverkhnostey. Razmernochistovaya i uprochnyayushchaya obrabotka detaley davleniem [Roller rolling of outer surfaces and ball rolling of internal surfaces. Finishing and hardening treatment of machine parts]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1963, pp. 144–160. (In Russ.)
4. Smirnov-Alyayev G.A. *Soprotivleniye materialov plasticheskoy deformirovaniyu* [Resistance of materials to plastic deformation]. Moscow; Leningrad: Mashgiz, 1961, 463 p. (In Russ.)
5. LS-DYNA Theoretical Manual. Compiled By John O. Hallquist. 1998. 498 p.
6. Hermann M. Fiderer M., Walters J. State-of-the-Art in Process Simulation of Forming Processes. Papers of the International Conference "New Developments in Forging Technology" in Fellbach (near Stuttgart). Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2005. 68 p.
7. Kozlov A., Khilkevich Y. The technology and equipment for cold bending of pipes. The 29th International Conference on Mechanical Engineering: Book of Conference Lecturer. Haifa, Israel: Technion, 2003. P. 190–192.
8. Kozlov A.V. Sherkunov V.G., Kyilkevich Ya.M. Stress state in pipe on flexure with internal shairing. Russian Engineering Research. New York: Allerton Press, Inc., 2009, vol. 29, no. 8. P. 809–812.
9. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling. *Key Engineering Materials*. Vol. 622–623, 2014, pp. 929–935.
10. Khaliulin E.V., Kozlov A.V. Use of a thermocouple to measure temperature during pipe bending and rolling. *Vestnik UGATU. Seriya "Mashinostroyeniye"* [Bulletin of USATU. Series: Mechanical Engineering. Ufa: Publishing House of USATU, 2014, vol. 18, no. 3 (64), pp. 93–96. (In Russ.)
11. Banabic D, Bunge H.J., Pohlandt K. and Tekkaya A.E. (2000), *Formability Of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits*, Springer, Berlin, Germany.
12. Hosford W.F. *Mechanical Behavior of Materials*. New-York, Cambridge University Press. 2005.
13. Ling K., Liu Y.-K. Study on forming process of the oil pipe with upset ends. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 456, pp. 648–651.
14. Veiler S.Ya., Likhtman V.I. *Deystvie smazok pri obrabotke metallov davleniem* [The effect of lubricants during metal forming]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960, 232 p. (In Russ.)
15. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process // *Petrochemical Equipment*. 2015. Vol. 44. P. 58–63.
16. Kozlov A.V., Bobylev A.V. On the possibility of cold bending of stainless steel and titanium alloy pipes. *Otraslevye aspekty tekhnicheskikh nauk* [Industry specific aspects of engineering sciences]. Moscow: INGN, 2012, pp. 6–10. (In Russ.)
17. Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 7, July 2014, pp. 78–83.
18. Gaydamak K.M. *Montazh oborudovaniya obshchego naznacheniya i tekhnologicheskikh truboprovodov* [Installation of general-purpose equipment and process piping]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 255 p. (In Russ.)
19. Tavastzherna R.I. *Izgotovleniye i montazh tekhnologicheskikh truboprovodov* [Manufacturing and installation of process piping]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 288 p. (In Russ.)
20. Galperin A.I. *Mashiny i oborudovanie dlya gibki trub* [Pipe bending machines and equipment]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1983, 203 p. (In Russ.)
21. Kozlov A.V., Sherkunov V.G. Computer modelling of the pipe bending and rolling process. *Vestnik TGU* [Tomsk State University Journal], 2009, pp. 11–15. (In Russ.)

22. Yuri F. Kurmachev, Ruslan E. Sokolov, Denis S. Voroshilov, Vadim M. Bepalov, Vladimir V. Moscvichev. The analytical dependence of the filling billets value to a given relative degree of deformation during cold rolling of tubes. *Journal of Siberian Federal University*. 2012 5 (7), pp. 731–736.

Received 22/06/18

Accepted 02/08/18

•

Образец для цитирования

Изучение тепловых явлений при гибке труб с раскатыванием / Бобылев А.В., Козлов А.В., Максимов С.П., Халиулин Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 87–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-87-97>

For citation

Bobylev A.V., Kozlov A.V., Maksimov S.P., Khaliulin E.V. Understanding the thermal phenomena occuring during pipe bending and rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 87–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-87-97>

•