

УДК 621.7

**В. Л. КАЛОЖНЫЙ, Я. С. ОЛЕКСАНДРЕНКО, И. П. КУЛИКОВ**

### **ХОЛОДНАЯ ГИБКА СТАЛЬНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ В ТРУБОГИБЕ С ПРОТОЧКОЙ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ НА ФАСОННОМ ВАЛКЕ**

С использованием метода конечных элементов изучен известный способ холодной гибки на определенном радиус стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке, на которой по середине расположен выступ. Для сравнения результатов было проведено моделирование формообразования для трех значений величины диаметра указанного выступа. Деформированию подвергались прямоугольные трубы из стали 10. Определены зависимости момента гибки стальных прямоугольных труб от угла поворота фасонного валка. Установлены конечные формы и размеры полученных холодной гибкой изделий, а также определено напряженно-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности с деформированного металла. Наблюдается отсутствие гофр, складок на изделиях и контакта боковой поверхности изделия с стенками фасонного валка, что гарантирует простоту извлечения изделия из рабочей зоны трубогиба. Установлено увеличение эффективности процесса гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с уменьшением величины диаметра выступа на рабочей поверхности фасонного валка.

**Ключевые слова:** холодная гибка, трубогиб, фасонный валок, проточка специального профиля, прямоугольная труба, метод конечных элементов, момент гибки, конечные форма и размеры, напряженно-деформированное состояние.

З використанням методу скінченних елементів вивчений відомий спосіб холодного гнуття на певний радіус сталевих прямокутних труб в трубогині з проточкою спеціального профілю на фасонному валку, на якій по середині розташований виступ. Для порівняння результатів було проведено моделювання формоутворення для трьох значень величини діаметра зазначеного виступу. Деформування називали прямокутні труби зі сталі 10. Визначено залежності моменту гнуття сталевих прямокутних труб від кута повороту фасонного валка. Встановлено кінцеві форма та розміри отриманих холодним гнуттям виробів, а також визначено напружено-деформований стан і ступінь використання ресурсу пластичності з деформованого металу. Спостерігається відсутність гофр, складок на виробах і контакту бічної верхньої поверхні виробу з стенками фасонного валка, що гарантує простоту вилучення виробу з робочої зони трубогину. Встановлено зростання ефективності процесу гнуття сталевих прямокутних труб в трубогині зі зменшенням величини діаметра виступу на робочій поверхні фасонного валка.

**Ключові слова:** холодне гнуття, трубогин, фасонний валок, проточка спеціального профілю, прямокутна труба, метод скінченних елементів, момент гнуття, кінцеві форма і розміри, напружено-деформований стан.

Interest in large-scale industrial enterprises to technology bending of steel rectangular pipes is steadily increasing. The greatest distribution they received in the shipbuilding, power engineering, automotive and aircraft industry – for the manufacture of the frame elements of various steel structures, ships, airplanes, cars. Using the finite element method investigated the known method of cold bending for a certain range of steel rectangular pipes on pipe bender with special profile groove on the shaped roller, the ledge is located in the middle of special profile groove. For comparison of the results, simulation of forming was conducted for three values of ledge's diameter. Subjected to deformation the rectangular pipes of steel 10. There're identified dependence of the rectangular steel pipe bending's moment of the angle of rotation of the shaped roller. Identified the final shape and size of the products obtained by cold bending, as well as stress-strain state and the degree of using of the resource of plasticity in deformed metal. There is a lack of corrugations, folds on the products and contact the side surface of the product with walls shaped roller, which ensures ease removal of product from the working zone of the pipe bender. Established increase efficiency of the process of cold bending of steel rectangular pipes on pipe bender with decreasing of value of ledge's diameter on the working surface of the shaped roller.

**Keywords:** cold bending, pipe bender, shaped roller, with special profile groove, rectangular pipe, finite element method, bending's moment, the final shape and size, stress-strain state.

**Введение.** Интерес крупных промышленных предприятий к технологиям гибки стальных прямоугольных труб неизменно растет. Наибольшего распространения они получили в судостроении, энергетическом машиностроении, автомобилестроении и авиастроении – для изготовления элементов каркаса различных металлоконструкций, судов, самолетов, автомобилей. Также растут требования к качеству получаемых гибкой изделий, которое заключается в исключении искажения формы и гофрообразования, и уменьшении утонения стенки.

Существуют способы гибки круглых труб и заготовок со сложным профилем поперечного сечения [1]. При гйбе таких заготовок возникают нежелательные побочные деформации элементов профиля – оваллизация сечения круглой трубной заготовки, а также потеря устойчивости (складкообразование) на отдельных элементах сгибаемой заготовки. Возникновение побочных деформаций является следствием

неравномерности напряженно-деформированного состояния элементов заготовки по ее ширине и длине. Одним из способов устранения побочных деформаций элементов профиля является применение гибки с дорном методом наматывания [2, 3]. Однако при таком способе наблюдается ряд дефектов, которые возникают под действием сжимающих напряжений на внутренней части гйба и образуют гофры, а в ряде случаев – складки, искажается проходное сечение трубы – овальность и сплющивание, приводит к потере устойчивости трубы. При использовании составных шаровых дорнов в зоне гйба из-за потери устойчивости стенки трубы образуются складки – гофры, при этом часть металла заполняет пространство между шарами, и образуются задиры, неровности и другие дефекты трубы. Для решения вышеуказанных проблем при гйбе с дорном существует технология гйбки труб методом продольного раскатывания [4, 5].

С увеличением количества предприятий мелкосерийного и серийного производства,

возрастает интерес к формообразованию изделий из стальных прямоугольных труб в универсальных гибочных машинах малого размера, например, трубогибочные станки, что накладывает определенные ограничения на процесс гибки. При горячей гибке возникают трудности с предварительным нагревом заготовок и при извлечении изделия из фасонного валака.

**Интенсификация процессов холодной гибки стальных прямоугольных труб.** Существует способ холодной гибки стальных прямоугольных труб с проточкой специального профиля на фасонном валке, который позволяет получать изделия, отвечающие вышеупомянутым требованиям к качеству. Схема формообразования в трубогибочном станке ВМ-65А представлена на рис. 1. Трубная заготовка 1 устанавливается в фасонный валок 2. Конец заготовки 1 фиксируется к фасонному валку 2 при помощи зажимного кольца 3, выполненного по внешним размерам трубной заготовки. Также заготовка фиксируется двумя прижимными валками 4. На поверхности прижимных валков выполняют проточку диаметрами  $d_1 = 63$  мм и  $d_2 = 82$  мм, шириной  $B = 42$  мм. Размеры зажимного кольца принимали равными размерам трубной заготовки, шириной  $X = 40$  мм. Для предотвращения образования гофр и складок в зонегиба, что является

следствием напряженного состояния при изгибе прямоугольных труб, когда нормальные тангенциальные напряжения вызывают сжимающие радиальные напряжения, на поверхности фасонного валака выполняют проточку специального профиля диаметрами  $D_1 = 150$  мм и  $D_2 = 175$  мм с выступом, диаметром  $d$  и высотой  $h$ , вдавливание которого компенсирует сжимающие напряжения, шириной  $B = 42$  мм. Деформированию подвергали прямоугольные трубные заготовки длиной  $L = 300$  мм, с размерами профиля:  $a = 400$  мм,  $b = 25$  мм,  $r = 4$  мм, толщиной стенки  $S = 2$  мм (рис. 2, а). Гибку осуществляют поворотом фасонного валака на определенный угол. Общий вид фасонного валака с проточкой специального профиля представлен на рис. 2, б.

**Цель работы.** Целью работы является определение рациональных размеров проточки специального профиля на рабочей поверхности фасонного валака при холодной гибке прямоугольных труб в трубогибе, предотвращающие образования гофр и складок, а также расширение заготовки в зонегиба, что приводит к осложнению изъятия деформированной заготовки из фасонного валака.

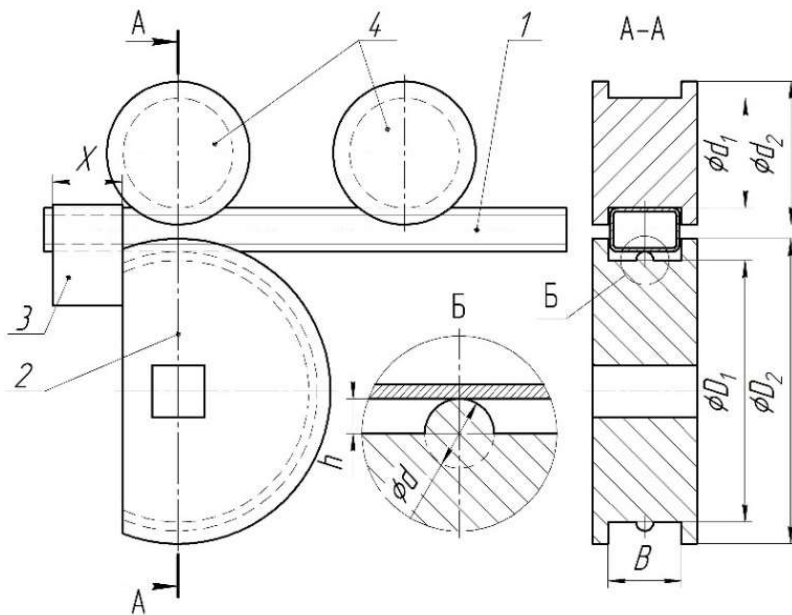


Рис. 1 – Схема способа гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке

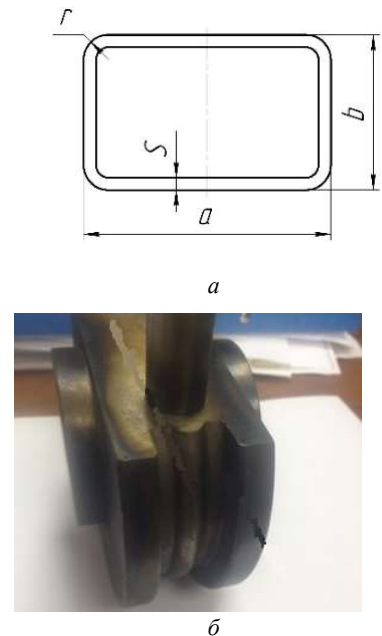


Рис. 2 – Размеры профиля заготовки и общий вид фасонного валака:  
а – размеры профиля заготовки,  
б – общий вид фасонного валака

**Постановка задачи моделирования процесса холодной гибки стальных прямоугольных труб.** Для установления

параметров гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке проведен расчетный анализ

методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе DEFORM Integrated 2D3D™. Холодной гибке подвергались прямоугольные трубчатые заготовки из Стали 10 (AISI-1010). Частота вращения приводного вала  $\nu=3$  об/мин. Величина коэффициента трения на контактирующих поверхностях заготовки с деформирующим инструментом была принята  $\mu=0,08$ . Задачи формоизменения решали в упругопластической постановке с упрочнением. Диаметр формообразующей выступ специального профиля на рабочей поверхности фасонного вала окружности  $d$  задавали в значениях  $d=10$  мм,  $d=15$  мм и  $d=20$  мм, высоту  $h$  принимали равной половине диаметра  $d$ .

**Энерго-силовые затраты процесса, форма, размеры и качество изделий при холодной гибке стальных прямоугольных труб.** Зависимость момента гибки от угла поворота фасонного вала для троих значений диаметра  $d$  приведена на рис. 3. Как видно с рисунка, графики подобны для троих значений диаметров  $d$ , наблюдается уменьшение величин момента в характерных точках графиков с уменьшением величины диаметра  $d$ . Максимального значения момента гибки достигает в конце процесса гибки и составляет 1350 кН·мм при величине диаметра  $d=20$  мм.

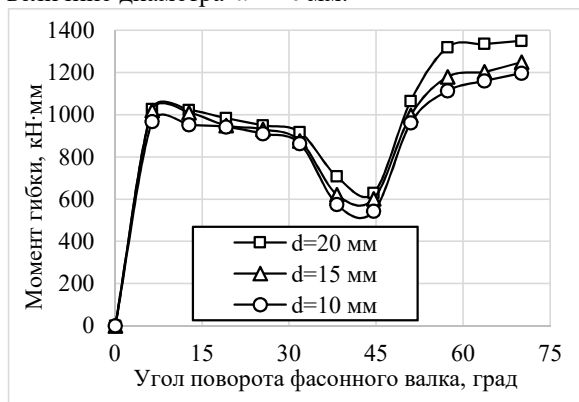


Рис. 3 – Зависимость момента гибки от угла поворота фасонного вала

Общий вид полученного изделия представлен на рис. 4 в разрезе с характеризующими размерами полученного изделия, в зоне наибольшего деформирования: величины высоты вдавливаемой впадины на контактной поверхности заготовки с выпуклостью вала  $h_2$  и толщины стенки  $S_2$ , высотой утяжины изделия на противоположной поверхности  $h_1$ , толщиной стенки  $S_1$  и шириной заготовки  $H$ . Наблюдается отсутствие гофр, складок и контакта боковой поверхности изделий с стенками фасонного вала, что гарантирует простоту изъятия изделия из трубогиба. Угол изгиба достигает значения  $\varphi = 70^\circ$ .

Величины размеров  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  и  $H$  для трех значений диаметра  $d$  занесены в табл. 1. С увеличением величины диаметра окружности формообразующей профиль выступа на рабочей поверхности фасонного вала  $d$  наблюдается увеличение высоты впадины  $h_2$  и утяжины  $h_1$ , снижение степени незначительного утолщения стенки изделия в зоне впадины  $S_2$  и степени утонения стенки в зоне утяжины  $S_1$ , а также увеличение значения ширины полученных изделий  $H$ .

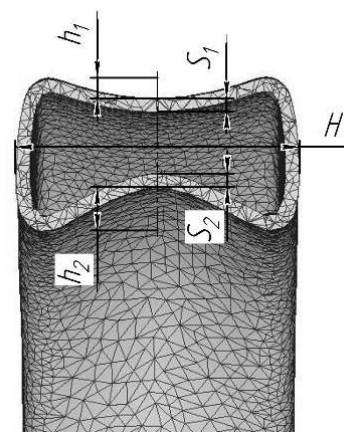


Рис. 4 – Общий вид полученного изделия в разрезе

Таблица 1 – Величины размеров, полученных холодной гибкой изделий, мм

$d$	$h_1$	$h_2$	$S_1$	$S_2$	$H$
10	3,06	5,96	1,95	2,11	40,86
15	3,24	7,91	1,94	2,09	41,12
20	3,38	8,67	1,93	2,07	41,44

**Напряженно-деформированное состояние в объеме металла полученных изделий холодной гибкой стальных прямоугольных труб.** Моделированием МКЭ установлено напряженно-деформированное состояние в полученных изделиях, что позволило выявить степень

использования ресурса пластичности  $\Psi$  в объеме сдеформированного металла. Проработку структуры металла холодной пластической деформацией и упрочнение сдеформированного

металла можна оцінити по розподіленню інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$ .

Розподілення інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбке с разными величинами діаметра, формообразующей спеціальний профіль проточки на робочій поверхні фасонного валка, окружности  $d$  в зоні найбільшого деформування наведено на рис. 5. Характер розподілення величин інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  для трьох величин діаметра, формообразующей спеціальний профіль на робочій поверхні фасонного валка,  $d$  подобен, с уменьшением діаметра  $d$  наблюдается не значительное снижение величин інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$ . Наибольшие значения

величини  $\varepsilon_i$  сконцентровані в зонах радіуса скруглення перпендикулярних друг-другу поверхностей изделия возле вдавленной впадины и утяжины и составили  $\varepsilon_i = 0,14$  для гнбки с величиной діаметра, формообразующей спеціальний профіль проточки на робочій поверхні фасонного валка, окружности  $d=10$  мм,  $\varepsilon_i = 0,17$  для величин  $d=15$  мм и  $d=20$  мм.

Розподілення напружень по осі Х (ось Х была принята по направлению длины заготовки)  $\sigma_x$  в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбке с разными величинами діаметра, формообразующей спеціальний профіль проточки на робочій поверхні фасонного валка, окружности  $d$  в зоні найбільшого деформування наведено на рис. 6.

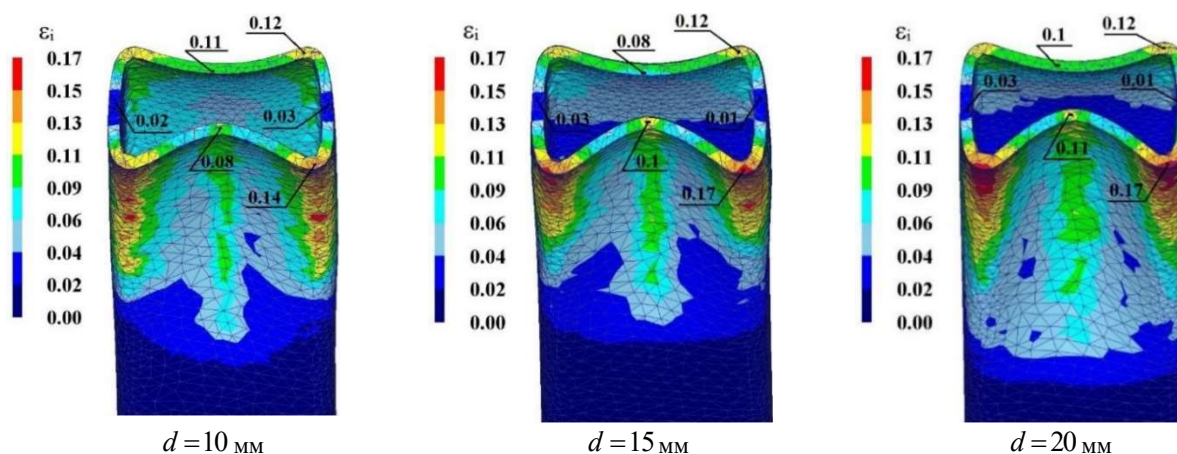


Рис. 5 – Розподілення інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбке с разными величинами діаметра формообразующей выступ спеціальний профіль на робочій поверхні фасонного валка окружности  $d$

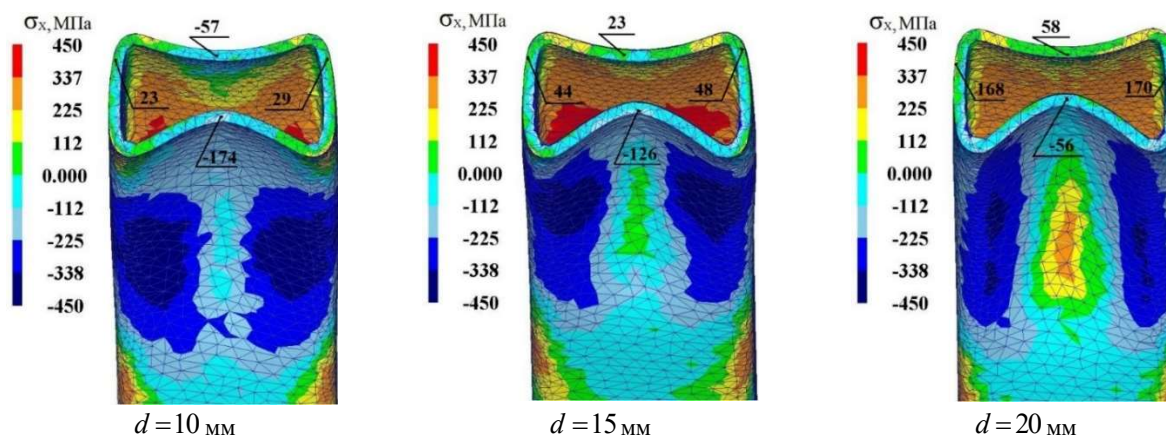


Рис. 6 – Розподілення напружень  $\sigma_x$  в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбке с разными величинами діаметра формообразующей выступ спеціальний профіль на робочій поверхні фасонного валка окружности  $d$

Как видно из рисунка, величины напряжений  $\sigma_X$  при холодной гибке стальных прямоугольных труб в зоне вдавливания выступа специального профиля и зоне утяжины разные по направлению, а значит внедрение выступа проточки специального профиля на рабочей поверхности фасонного вала в тело заготовки компенсирует возникающие при гибке сжимающие напряжения и предотвращает образование гофр и складок в зонегиба. Величины напряжений по оси X в зоне вдавливания выступа специального профиля и зоне утяжины составили  $\sigma_X = -174$  МПа и  $\sigma_X = -57$  МПа соответственно для гибки с величиной диаметра, формообразующей специальный профиль проточки на рабочей поверхности фасонного вала, окружности  $d = 10$  мм,  $\sigma_X = -126$  МПа и  $\sigma_X = 23$  МПа соответственно

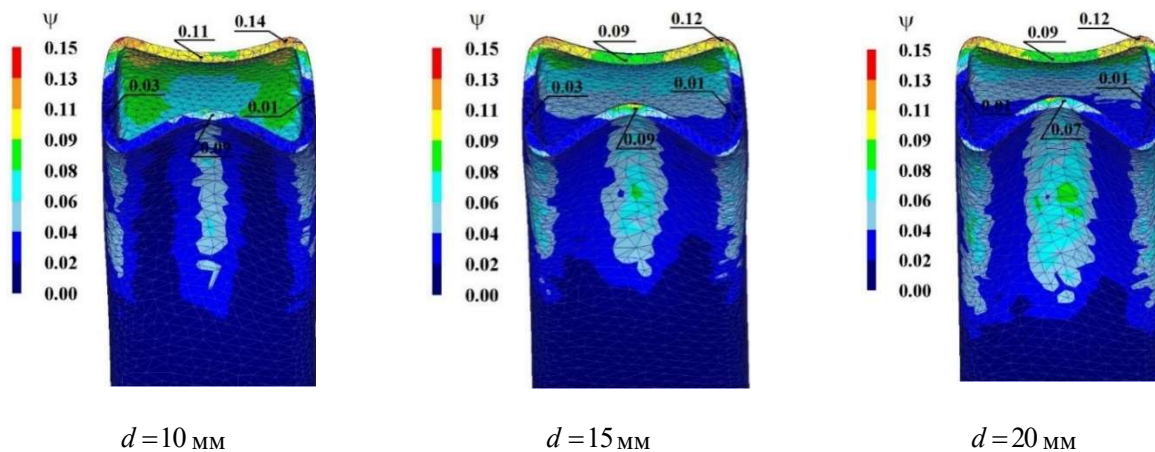


Рис. 7 – Распределение степени использования ресурса пластичности  $\psi$  в объеме сдеформированного металла изделий, полученных при гибке с разными величинами диаметра формообразующей выступ специального профиля на рабочей поверхности фасонного вала окружности  $d$

С уменьшением диаметра  $d$  наблюдается незначительное увеличение величин степени использования ресурса пластичности  $\psi$ . Максимального значения степень использования ресурса пластичности достигает величины  $\psi = 0,14$ , что является меньше допустимого для деформирования без разрушений.

На основе полученных данных выбираем рациональный размер проточки специального профиля на фасонном валке с величиной формообразующей выступ окружности  $d = 10$  мм.

#### Выводы:

1. Методом конечных элементов разработана математическая модель и проведен расчетный анализ процесса гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке.

2. Расчетом установлены энергосиловые затраты процесса гибки стальных прямоугольных труб, конечная форма и размеры полученных изделий, а также напряженно-деформированное

для  $d = 15$  мм, а также  $\sigma_X = -56$  МПа и  $\sigma_X = 58$  МПа соответственно для  $d = 20$  мм. С уменьшением диаметра  $d$  наблюдается снижение величин напряжений  $\sigma_X$ .

**Определение степени использования ресурса пластичности в объеме сдеформированного металла.** Распределение степени использования ресурса пластичности  $\psi$  в объеме сдеформированного металла изделий, полученных при гибке с разными величинами диаметра, формообразующей специальный профиль проточки на рабочей поверхности фасонного вала, окружности  $d$  в зоне наибольшего деформирования приведен на рис. 7.

состояние и степень использования ресурса пластичности в них для трюих величин диаметра окружности формообразующей профиль выступа на рабочей поверхности фасонного вала.

3. Установлено отсутствие контакта боковой поверхности полученных гибкой изделий с стенками фасонного вала, что гарантирует простоту изъятия изделия из рабочей зоны трубогиба.

4. В проведенном сравнительном анализе показано увеличение эффективности процесса гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с уменьшением величины диаметра окружности формообразующей профиль выступа на рабочей поверхности фасонного вала.

5. Выбрана наиболее рациональная величина диаметра окружности формообразующей профиль выступа проточки специального профиля на фасонном валке  $d = 10$  мм.

#### Список литературы

1. Мошин Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование. – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1967. – 129 с.

2. [Электронный ресурс] URL: <http://technomash.megasklad.ru>.
3. [Электронный ресурс] URL: <http://www.tubend.ru/theory/132>.
4. Козлов А.В. Определение предельных натягов и усилий при гибке труб методом раскатывания / А.В. Козлов, Я.М. Хилькевич // Известия Челябинского научного центра. – 2004 г. – С. 101–106.
5. Патент 2 397 835 РФ, МПК B21D 9/14, Способ холодной гибки труб./ Глазков А.В. №2008145769/02; заявление 18.11.2008; опубл. 27.08.2010. Бюл. №24.

**References (transliterated)**

1. Moshnin E.N. *Gibka i pravka na rotatsionnykh mashinakh. Tehnologiya i oborudovanie*. [Bending and straightening on rotary

machines. Technology and equipment]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967. – 129 p.

2. [Elektronnyiy resurs] URL: <http://technomash.megasklad.ru>.
3. [Elektronnyiy resurs] URL: <http://www.tubend.ru/theory/132>.
4. Kozlov A.V. *Opreделение predelnykh natyagov i usilii pri gibke trub metodom raskatyvaniya* [Determination of tightness and extreme force when bending tubes by rolling] // Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra. 2004 – P. 101–106.
5. Patent 2 397 835 RF, MPK B21D 9/14, Sposob holodnoy gibki trub./ Glazkov A.V. №2008145769/02; zayavlenie 18.11.2008; opubl. 27.08.2010. Byul. No 24

*.Postupila (received) 10.11.2016.*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Холодная гибка стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке / В. Л. Калужный, Я. С. Олександренко, И. П. Куликов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 36–41. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671**

**Холодне гнуття сталевих прямокутних труб в трубогині з проточкою спеціального профілю на фасонному валку / В. Л. Калужний, Я. С. Олександренко, І. П. Куліков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 36–41. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671**

**Cold bending of steel rectangular pipes on pipe bender with special profile groove on the shaped roller / V.L. Kaluzhny, Ya. S. Oleksandrenko, I. P. Kulikov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 36–41. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Калужный Владимир Леонидович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», профессор кафедры Механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (098)273-44-19; e-mail: [kw1\\_2011@ukr.net](mailto:kw1_2011@ukr.net).

**Калужний Володимир Леонідович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри Механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (098)273-44-19; e-mail: [kw1\\_2011@ukr.net](mailto:kw1_2011@ukr.net).

**Kaluzhny Vladimir Leonidovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Professor of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (098)273-44-19; e-mail: [kw1\\_2011@ukr.net](mailto:kw1_2011@ukr.net).

**Олександренко Ярослав Сергеевич** – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», аспирант кафедры Механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (050)199-61-29; e-mail: [oleksandrenkoyaroslav@gmail.com](mailto:oleksandrenkoyaroslav@gmail.com).

**Олександренко Ярослав Сергійович** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспирант кафедри Механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050)199-61-29; e-mail: [oleksandrenkoyaroslav@gmail.com](mailto:oleksandrenkoyaroslav@gmail.com).

**Oleksandrenko Yaroslav Sergeevich** – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", aspirant of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (050)199-61-29; e-mail: [oleksandrenkoyaroslav@gmail.com](mailto:oleksandrenkoyaroslav@gmail.com).

**Куликов Иван Петрович** – инженер государственного предприятия «Авиант», г. Киев; тел.: (063)658-97-81; e-mail: [iv8h@mail.ru](mailto:iv8h@mail.ru).

**Куліков Іван Петрович** – інженер державного підприємства «Авіант», м. Київ; тел.: (063)658-97-81; e-mail: [iv8h@mail.ru](mailto:iv8h@mail.ru).

**Kulikov Ivan Petrovich** – Engineer of State Enterprise "Aviant", Kyiv; tel.: (063)658-97-81; e-mail: [iv8h@mail.ru](mailto:iv8h@mail.ru).