

**Bibliography (transliterated):** 1. Korotkyh E.D. Application of glass lubricants for hot deformation of the workpiece E.D. Korotlyh, M.P. Ponomarev, B.I. Teleshev Forging and stamping production. – 1975. – No4 . – P. 9. 2. Korneev M.I. The use of glass protective coatings when punching blades from HRSA M.I. Korneev, I.G. Skugarev . – Moscow: Mechanical Engineering , 1966 . – 140 p. 3. Solntcev S.S. Protective coatings of metals by heating S.S. Solntcev, A.G. Tumanov. – Moscow: Mechanical Engineering, 1976. – 256 p. 4. Solntcev S.S. Protective coatings on heating: Handbook S.S. Solntsev. – Moscow Book House »Librokom», 2009,– 248 p. 5. Grudev A.P. Friction and lubrication in metal forming A.P. Grudev, Y.V. Zilbert , V.T. Tilik . – Moscow: Metallurgy , 1982. – 310 p.

Поступила (received) 26.10.2014

УДК 621.73

**В. В. КУХАРЬ**, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ИЗГИБЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРОДОЛЬНО ПРИЛОЖЕННЫМИ СИЛАМИ**

Аналитически рассмотрены процессы деформации при получении профилированных заготовок продольным изгибом для последующих завершающих операций объемной штамповки иликовки. Разработана методика расчета и установлены закономерности изменения относительного радиуса кривизны нейтрального слоя, смещения нейтральной линии деформаций и развития деформаций на внутреннем и наружном радиусе по биссектрисе угла изгиба цилиндрической заготовки при продольном изгибе в зависимости от таких основных параметров как степень деформации и соотношение габаритных размеров исходной заготовки.

**Ключевые слова:** продольный изгиб, цилиндрическая заготовка, профилирование, деформация, смещение нейтрального слоя, радиус кривизны, крайние волокна.

**Введение.** Изгиб заготовок продольно приложенными силами в процессах обработки металлов давлением (осадка, высадка, протяжка, производство гнутых профилей) долгое время рассматривали только как негативное явление, принимая технологические решения по его исключению. В большинстве случаев такие решения являются оправданными. Возникновение продольного изгиба у цилиндрических заготовок связано с потерей ими устойчивости, когда отношение диаметра  $D_0$  к высоте  $L_0$  заготовки (т.е. коэффициент контакта  $D_0/L_0$ ) меньше определенной критической величины, а прилагаемая сила достаточна для возникновения начального выпучивания и дальнейшего развития деформации. При осадке или высадке заготовок чаще оперируют обратным соотношением  $m_0 = L_0/D_0$  [1], т.е. относительной высотой заготовки. Однако в настоящее время предложен ряд технологических процессов, основанных на положительном использовании явления продольного изгиба, и проведено изучение закономерностей формоизменения заготовок с различной формой поперечного сечения [2–5]. При этом оценка

---

© В. В. Кухарь, 2014

деформационных процессов, протекающих по биссектрисе угла продольно изгибаемых цилиндрических заготовок, проведена не была.

**Анализ последних исследований и литературы.** Аналитически [6] и на основе результатов конечно-элементного моделирования [7] установлено, что при продольном изгибе зона сжатия в поперечных сечениях заготовки всегда больше зоны растяжения. В процессах осадки и высадки продольный изгиб исключают путем отрезки заготовок с относительной высотой  $m_0$ , меньшей критической величины  $m_{kr}$ . В способах восстановления длинномерных деталей осадкой В. А. Огородников [8] и Д. В. Хван [9] на основе энергетического метода определили условия появления продольного изгиба и предложили решения проблемы обеспечения устойчивости формоизменения за счет введения промежуточных термообработок между стадиями ступенчатой осадки или использования специализированного инструмента. Исследования течения металла на переходах высадки заготовок с  $m_0 > 3,5$  в ручьях горизонтально-ковочных машин (ГКМ) проводили Е. И. Семенов, И. С. Зиновьев, А. Х. Грайфер, А. Г. Овчинников, А. Д. Томлёнов, Л. С. Зисерсон и др. При этом установлено, что изогнутая ось заготовки формируется в соответствии с механикой двусторонней заделки стержня, а величины критических отношений  $m_{kr}$  находятся в пределах от 2,5 до 3,76. Такой разброс связан с принятием разными авторами различных условий трения на контакте, состояния торца заготовки, характеристик кривой упрочнения деформируемого материала и др.

В условиях Херсонского завода карданных валов, по предложению К. К. Дьямантипуло, явление продольного изгиба было использовано для рационализации технологии штамповки поковок с изогнутой осью [10]. Продольный изгиб, проводимый параллельными плитами, обеспечивает за один ход прессы сбив окалины, гибку и предпочтительное перераспределение металла по длине заготовки, что способствует благоприятному формообразованию поковок в штамповочных ручьях, а в некоторых случаях позволяет достичь экономии металла до 53 % на каждой поковке [2].

Продольный изгиб целесообразно рассматривать как совокупность одновременно происходящих процессов формообразования бокового профиля полуфабриката и изгиба заготовки (рис. 1). На основе использования метода смещенного объема успешно выполнена теоретическая оценка степени деформации, связанной с образованием профиля заготовок (появлением участков с максимальным  $D_{max}$  и минимальным  $D_{min}$  диаметром) при продольном изгибе [11]. Однако, для научно-обоснованного назначения технологических режимов профилирования также актуальным является выяснение картины деформаций, связанных с изгибом заготовки, т.е.

определение взаимосвязи радиуса кривизны, положения нейтрального слоя и деформации крайних волокон заготовки с технологическими режимами продольного изгиба.

**Целью настоящей работы** является развитие теоретических основ продольного изгиба с точки зрения определения закономерностей взаимосвязи радиуса кривизны, положения нейтрального слоя по биссектрисе угла изгиба и степеней деформации крайних волокон заготовки круглого поперечного сечения с технологическими параметрами профилирования.

**Материалы исследования.** Технологический параметр процесса, характеризующий рабочий ход инструмента, определяют как

$$\varepsilon_y = \frac{L_0 - H_k}{L_0} 100\% = \frac{\Delta H}{L_0} 100\%, \quad (1)$$

где  $H_k$  и  $\Delta H$  – конечная высота заготовки после осадки с продольным изгибом заготовки и рабочий ход инструмента соответственно.

Схема нагружения при продольном изгибе соответствует гибке с приложением осевой сжимающей силы, действие которой приводит к тому, что волокна со стороны внешнего радиуса профилированной заготовки могут находиться в сжатом состоянии (рис. 2). Величины и знаки деформаций крайних волокон в поперечном сечении по биссектрисе угла изгиба заготовки, при прочих равных условиях, зависят от значений  $\varepsilon_y$  и  $m_0$ .



Рис. 1 – Заготовки после продольного изгиба

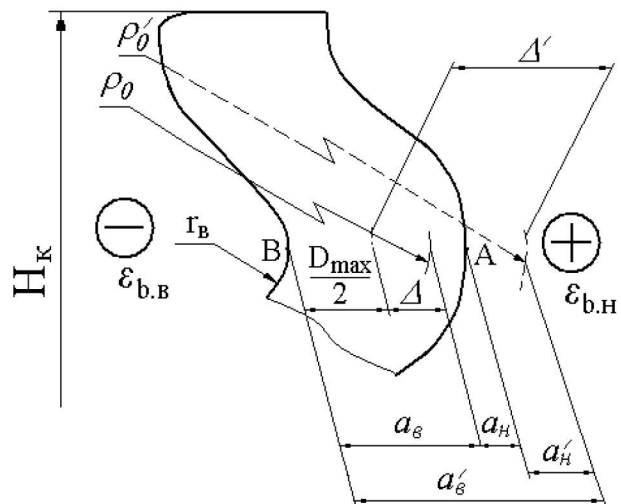


Рис. 2 – Схема к расчету деформаций крайних волокон при продольном изгибе

Степень деформации  $\varepsilon_b$ , характеризующую изгиб, т.е. состояние крайних волокон поперечного сечения заготовки по биссектрисе угла изгиба, можно определить на основании формулы [12–14]:

$$\varepsilon_b = y / \rho_0, \quad (2)$$

где  $y$  – расстояние до волокна от нейтральной линии, определяемой радиусом кривизны нейтрального слоя  $\rho_0$ .

Для процессов гибки листового материала величину радиуса кривизны нейтрального слоя  $\rho_0$  определяют по формулам В. П. Романовского и И. П. Ренне, приведенных, например, в источниках [12–14]:

$$\rho_0 = \left( \frac{r_b}{s} + \frac{\zeta}{2} \right) \cdot \zeta \cdot s \cdot \frac{b_{cp}}{b}, \quad (3)$$

где  $\zeta = s_{ut} / s$  – коэффициент утонения материала, причем  $s$  и  $s_{ut}$  толщина листового материала до и после гибки соответственно;

$r_b$  – величина внутреннего радиуса при гибке;

$b$  и  $b_{cp}$  – ширина полосы до гибки и средняя ширина полосы после гибки.

Тогда, применительно к процессу продольного изгиба, когда имеет место не утонение, а неравномерное утолщение поперечного сечения заготовки, формулу (3) преобразуем к относительному выражению:

$$\frac{\rho_0}{D_0} = \left( \frac{r_b}{D_0} + \frac{k_2}{2} \right) k_2 \frac{1}{2} (k_1 + k_2). \quad (4)$$

Для вычисления  $r_b / D_0$ ,  $k_1 = D_{\min} / D_0$  и  $k_2 = D_{\max} / D_0$  в результате обработки экспериментальных данных по продольному изгибу заготовок из неупрочняющегося материала (свинец, горячая деформация углеродистых сталей) получены следующие зависимости [15]:

$$\lg \left( \frac{r_b}{D_0} \right) = A_r \cdot m_0^3 + B_r \cdot m_0^2 + C_r \cdot m_0 + D_r, \quad (5)$$

где  $A_r = 12,207 \cdot \varepsilon_y^3 - 14,193 \cdot \varepsilon_y^2 + 4,6031 \cdot \varepsilon_y - 0,6001$ ;

$B_r = -159,39 \cdot \varepsilon_y^3 + 187,01 \cdot \varepsilon_y^2 - 60,639 \cdot \varepsilon_y + 8,1419$ ;

$C_r = 684,87 \cdot \varepsilon_y^3 - 812,76 \cdot \varepsilon_y^2 + 264,59 \cdot \varepsilon_y - 37,055$ ;

$D_r = -1026,1 \cdot \varepsilon_y^3 + 1229,3 \cdot \varepsilon_y^2 - 408,34 \cdot \varepsilon_y + 59,923$ ,

$$k_1 = \frac{D_{\min}}{D_0} = A_d'' m_0^3 + B_d'' m_0^2 + C_d'' m_0 + D_d'', \quad (6)$$

где  $A_d'' = 1,0677 \cdot \varepsilon_y^3 + 0,1951 \cdot \varepsilon_y^2 - 0,4685 \cdot \varepsilon_y + 0,0706$ ;

$B_d'' = -15,485 \cdot \varepsilon_y^3 - 3,415 \cdot \varepsilon_y^2 + 7,3915 \cdot \varepsilon_y - 1,0986$ ;

$$C_d'' = 72,358 \cdot \varepsilon_y^3 + 20,591 \cdot \varepsilon_y^2 - 38,95 \cdot \varepsilon_y + 5,667;$$

$$D_d'' = -108,82 \cdot \varepsilon_y^3 - 40,947 \cdot \varepsilon_y^2 + 68,253 \cdot \varepsilon_y - 8,6315,$$

$$k_2 = \frac{D_{\max}}{D_0} = A_d \cdot m_0^3 + B_d \cdot m_0^2 + C_d \cdot m_0 + D_d, \quad (7)$$

где  $A_d = 0,7794 \cdot \varepsilon_y^3 - 0,6661 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,0898 \cdot \varepsilon_y - 0,0034;$

$$B_d = -11,432 \cdot \varepsilon_y^3 + 9,858 \cdot \varepsilon_y^2 - 1,526 \cdot \varepsilon_y + 0,0752;$$

$$C_d = 57,264 \cdot \varepsilon_y^3 - 50,311 \cdot \varepsilon_y^2 + 8,9265 \cdot \varepsilon_y - 0,514;$$

$$D_d = -97,215 \cdot \varepsilon_y^3 + 87,446 \cdot \varepsilon_y^2 - 16,713 \cdot \varepsilon_y + 2,0905.$$

Положение нейтральной линии в процессах с совместным действием сжатия и изгиба смещено в сторону растянутых волокон, где деформация обозначается со знаком «+» (см. рис. 2), т.е. зона сжатия в поперечном сечении заготовки является большей, чем зона растяжения. Со стороны сжатых волокон деформация обозначена «-». Величину смещения нейтрального слоя от центра поперечного сечения по биссектрисе угла изгиба обозначим через  $\Delta$ , при этом:

$$\Delta = \rho_0 - r_b - \frac{D_{\max}}{2}, \quad (8)$$

или в относительном виде:

$$\frac{\Delta}{D_0} = \frac{\rho_0}{D_0} - \frac{r_b}{D_0} - \frac{k_2}{2}. \quad (9)$$

Обозначим через  $a_b$  и  $a_H$  расстояния от нейтральной линии до наружного (А) внутреннего (В) волокна по рассматриваемому поперечному сечению (см. рис. 2). При значительной доле деформации сжатия все поперечное сечение находится в области отрицательных деформаций, которые являются большими на внутреннем радиусе и меньшими на наружном. Тогда нейтральная линия условно выходит за пределы поперечного сечения на величину  $\Delta'$  от центра (на рис. 2 её радиус кривизны обозначен как  $\rho_0'$ ). Для данного случая расстояния от нейтральной линии до внутреннего и наружного волокна обозначены  $a_b'$  и  $a_H'$  соответственно. Следовательно, с сохранением отрицательного знака для сжатых волокон и положительного для случая наличия растянутых волокон, определим:

$$a_b' = a_b = (r_b - \rho_0); \quad (10)$$

$$a_H' = a_H = (r_b - \rho_0 + D_{\max}). \quad (11)$$

Или в относительном выражении:

$$(a_b / D_0) = (r_b - \rho_0) / D_0; \quad (12)$$

$$(a_H / D_0) = (r_b - \rho_0) / D_0 + k_2 \quad (13)$$

Тогда, согласно выражениям (2), (12) и (13) деформацию внутренних и наружных волокон находим соответственно:

$$\varepsilon_{b,b} = (a_b / D_0) / (\rho_0 / D_0); \quad (14)$$

$$\varepsilon_{b,H} = (a_H / D_0) / (\rho_0 / D_0). \quad (15)$$

Таким образом, разработана методика, позволяющая найти взаимосвязь величины относительного радиуса нейтрального слоя ( $\rho_0 / D_0$ ), вычисляемого по формуле (4), значения относительного смещения нейтрального слоя ( $\Delta / D_0$ ), вычисляемого по формуле (9), и значений деформаций крайних волокон, вычисляемых по формулам (14) и (15), с основными технологическими параметрами продольного изгиба:  $\varepsilon_y$  и  $m_0$ . Результаты выполненных расчетов приведены на рис. 3 и рис. 4 для величин  $m_0 = 4,0; 5,0$  и  $6,0$  при наиболее приемлемых значениях  $\varepsilon_y = 20 \dots 50 \%$  ( $\varepsilon_y = 0,2 \dots 0,5$ ).

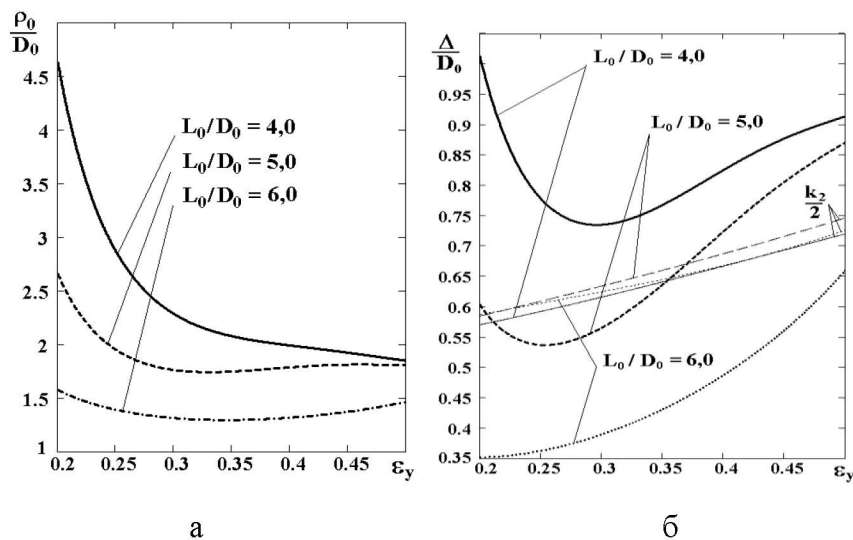


Рис. 3 – результаты выполненных расчетов: а – изменение относительного радиуса кривизны нейтрального слоя и б – изменение относительного смещения нейтрального слоя от центра поперечного сечения по биссектрисе угла продольного изгиба заготовки

С наступлением выпучивания и увеличением составляющей изгиба радиус кривизны нейтрального слоя заготовки уменьшается, причем у коротких заготовок ( $m_0 = 4,0$ ) наступает более резкий переход от сжатия к изгибу, из-за чего значения ( $\rho_0 / D_0$ ) резко снижаются (см. рис. 3,а). Относительное смещение нейтрального слоя ( $\Delta / D_0$ ) (см. рис. 3,б) свидетельствует о том, что



до  $\varepsilon_y = 25 \dots 30 \%$  доля составляющей изгиба является существенной, а дальнейший рост параметра  $\varepsilon_y$  приводит к возрастанию составляющей сжатия.

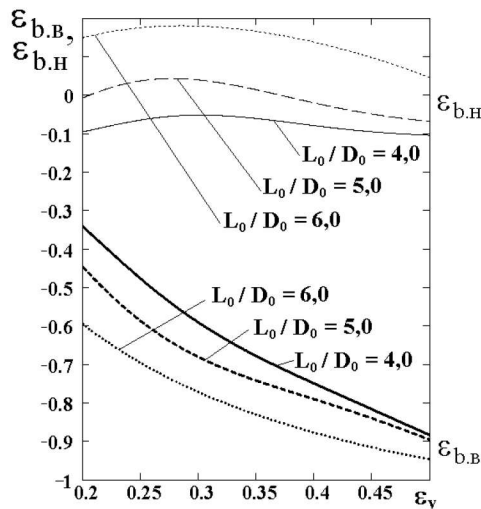


Рис. 4 – Взаимосвязь деформаций наружных и внутренних волокон заготовки с технологическими параметрами процесса профилирования продольным изгибом

При величинах  $(\Delta/D_0) < k_2/2$  в поперечном сечении существует зона растяжения. Следовательно, по рис. 3, б, на протяжении исследованного диапазона  $\varepsilon_y = 20 \dots 50 \%$  у высоких заготовок с  $m_0 = 6,0$  существует зона растяжения, у заготовок с  $m_0 = 5,0$  зона растяжения появляется в диапазоне  $\varepsilon_y = 22 \dots 35 \%$ , а заготовки с  $m_0 = 4,0$  на протяжении всего деформирования находятся в области сжатия. Это также подтверждают расчеты, проведенные по формулам (14) и (15), результаты которых приведены на рис. 4.

**Выводы.** Разработана методика расчета и установлены закономерности изменения относительного радиуса кривизны нейтрального слоя, смещения нейтральной линии деформаций и развития деформаций на внутреннем и наружном радиусе по биссектрисе угла изгиба цилиндрической заготовки при продольном изгибе в зависимости от технологического параметра степени деформации  $\varepsilon_y$  и относительной высоты заготовки  $m_0$ .

**Список литературы:** 1. Грайфер А. Х. Об устойчивости заготовок при осадке и высадке / А. Х. Грайфер // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 11. – С. 11–13. 2. Кухарь В. В. Малозатратные инновационные решения в технологии и оборудовании кузнечно-штамповочного производства / В. В. Кухарь // Металл и литье Украины. – 2008. – № 9. – С. 33–36. 3. Кухарь В. В. Формоизменение при профилировании продольным изгибом заготовок с различной формой поперечного сечения / В. В. Кухарь // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» / НТУУ «ХПІ». – К., 2010. – № 60. – С. 169–173. – (Машинобудування). 4. Кухарь В. В. Формообразование элементов трубопроводов продольным изгибом / В. В. Кухарь, А. В. Грушко // Захист металургійних машин від поломок: міжвуз. зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 12. – С. 147–152. 5. Илюшкин М. В. Изготовление методом осадки в роликах перфорированных гнутых профилей уголкового типа / М. В. Илюшкин, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Формообразование гнутых профилей: теория и практика :

Сборник научных трудов / Под науч. ред. д-ра техн. наук, профессора В. И. Филимонова. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 159 с. – Режим доступа : <http://studik.net/izgotovlenie-metodom-osadki-v-rolikakh-perforirovannykh-gnutyx-profilej-ugolkovogo-tipa>. – Дата звернення : 30 жовтня 2014. **6.** Masuda M. Compression Bending / M. Masuda, Y. Tosava // Bull. Jap. Soc. precision Eng-ng. – 1963. – No 1. – P. 33–35. **7.** Goton Manabu. Elastic-plastic analysis of uni-lateral and bi-lateral compression of severe deformation on the basis of J2F and J2G / Goton Manabu, Shibata Yuji // Trans. Jap. Soc. Eng. A. – 1990. – No 56. – P. 529. **8.** Огородніков В. А. Відновлення деталей машин методом пластичної формозміни / В. А. Огородніков, В. Ф. Сердюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1996. – No 3. – С. 58–62. **9.** Хван Д. В. Осадка длинномерных заготовок как нетрадиционный способ обработки металлов давлением / Д. В. Хван, А. А. Воронаев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ-Хмельницький, 2002. – С. 143–147. **10.** Способ изготовления деталей типа поворотного кулака: а.с. 1612433 А1 СССР, МКИ В 21 К 1/08 / К. К. Дьямантипуло, Ю. А. Смолиенко, О. Ю. Кумунджиева (СССР). – No 4449233/31-27; заявл. 23.05.88; опубл.16.06.91. **11.** Кухарь В. В. Смещенный объем и степень деформации при формообразовании профиля заготовки продольным изгибом / В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск, 2014. – No 1 (38). – С. 71–76. **12.** Зубцов М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – М.–Л.: Машгиз, 1958. – 459 с. **13.** Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – М.: Машиностроение, 1990. – 674 с. **14.** Лысов М. И. Формообразование деталей гибкой / М. И. Лысов, Н. В. Сосов. – М.: Машиностроение, 2001. – 388 с. **15.** Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки : монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. – Мариуполь: изд-во ЗАО «Газета «Приазовский рабочий», 2011. – 336 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Graifer, A. Kh. «Ob ustoichivosti zagotovok pri osadke i vysadke». *Kuznechno-shtampovochnoje ptiozvodstvo*, issue 11, 1970. 11–13. Print. **2.** Kukhar, V. V. «Malozatratnyje innovatsionnyje reshenija v tekhnologii i oborudovanii kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva». *Metall i litjo Ukrainy*, issue 9, 2008. 33–36. Print. **3.** Kukhar, V. V. «Formoizmenenije pri profilirovanii prodolnym izgiбом zagotovok s razlichnoj formoj poperechnogo sechenija». *Visnyk NTUU «KPI»*. Kiev, issue 60, 2010. 169–173. Print. **4.** Kukhar, V. V., Hrushko, A. V. «Formoobrazovaniye elementov truboprovodov prodolnym izgiбом». *Zahyst metallurgijnykh machin ot polomok*, PDTU, Mariupol, issue 12, 2010. 147–152. Print. **5.** Iljushkin, M. V., Markovtsev V. A., Filimonov V. I. «Izgotovlenije metodom osadki v rolikakh perforirovannykh hnutyx profilej ugolkovogo tipa». *Formoobrazovaniye hnutyx profiley : teorija i praktika : Sbornik nauchnykh trudov*, Pod nach. red. profi V. I. Filimonova. Uljanovsk : UIGTU. 2012. 159. Print. <<http://studik.net/izgotovlenie-metodom-osadki-v-rolikakh-perforirovannykh-gnutyx-profilej-ugolkovogo-tipa>>. Web. 30.10.2014. **6.** Masuda, M., Tosava Y. «Compression Bending». *Bull. Jap. Soc. precision Eng-ng*, issue 1, 1963. 33–35. Print. **7.** Goton Manabu, Shibata Yuji. «Elastic-plastic analysis of uni-lateral and bi-lateral compression of severe deformation on the basis of J2F and J2G». *Trans. Jap. Soc. Eng. A* issue 56, 1990. 529. Print. **8.** Ogorodnikov, V. A., Serdjuk, V. F. Vidnovlennja detalej mashin methodom plastychnoji formozminy. *Visnyk VPI*, issue 3, 1996. 58–62. Print. **9.** Khvan, D. V., Voropajev, A. A. «Osadka dlinnomernyh zagotovok kak netraditsionnyj method obrabotki davlenijem». *Udoskonalennja protsesiv i obladnannia obrobky tyskom v metalurgii i mashinobuduvanni : zb. nauk. pr.*, Kramatorsk-Khmel'nitskij, 2002. 143–147. Print. **10.** Diamantopulo, K. K., Smolijenko, Yu. A., Kumundzhijeva, O. Yu. «Sposob izgotovlenija detalej tipa povorotnogo kulaka». *A. s. 1612433 A1 SSSR*, MКИ V 21 K 108, No. 444923331-27; zayav. 23.05.88; opubl.16.06.91. Print. **11.** Kukhar, V. V. «Smeshrnnij objom i stepen' deformatsii pri formoobrazovani profilya zagotovki prodolnym izgiбом». *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr.*, DGMA, Kramatorsk, issue 1 (38), 2014. 71–76. Print. **12.** Zubtsov, M. E. *Listovaja shtampovka*, Moscow.-Leningrad: Mashgiz, 1958. 459. Print. **13.** Romanovskij, V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke*, Moscow, Mashinostrojenije, 1990. 674. Print. **14.** Lysov, M. I., Sosov, N. V. *Formoobrazovaniye detalej gibkoj*, Moskva, Mashinostrojenije, 2001. 388. Print. **15.** Grinkevich, V. A., Kukhar, V. V., Krajev, M. V. Burko, V. A. *Analiz plastycheskogo formoizmenenija v chastnyh zadachakh kovki i shtampovki : monografija*, Mariupol, izd-vo ZAO «Gazeta Priazovskij rabochij», 2011. 336. Print.

Поступила (received) 22.10.2014