

**ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ГИБКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ****В. Ю. Черкащенко, А. А. Черныш, А. В. Воронин**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Рассмотрены процессы гибки с дополнительным нагружением при последовательном нагружении. Дан анализ исследования зависимости пластичности от схемы напряжённого состояния. Оценка эффективности процесса гибки проведен без расчёта напряжённо-деформируемого состояния заготовки. Из условий равновесия элемента заготовки получено уравнение, которое в явном виде выражает зависимость изменения толщины заготовки в ее различных сечениях от ее предела текучести и толщины, усилия гибки и коэффициента трения. Приведены результаты производственных экспериментов по гибке дуг пассажирских вагонов при изгибе и изгибе с растяжением. Установлено влияние схемы нагружения в процессах гибки, оттяжки и формовки на разностенность получаемых деталей. При гибке с растяжением разностенность минимальна, когда усилие растяжения компенсирует действие сил трения. При гибке с растяжением и формовке по изменению толщины заготовки определён коэффициент трения между пуансоном и заготовкой.

**Ключевые слова:** гибка, растяжение, трение, дуга.**ВПЛИВ СХЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОЦЕС ГНУТТЯ З РОЗТЯГАННЯМ****В. Ю. Черкащенко, А. А. Черныш, О. В. Воронін**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Розглянуто процеси гнуття з додатковим навантаженням при послідовному навантаженні. Наданий аналіз дослідження залежності пластичності від схеми напруженого стану. Оцінка ефективності процесу гнуття проведено без розрахунку напружено-деформованого стану заготовки. З умов рівноваги елемента заготовки отримано рівняння, яке в явному вигляді виражає залежність зміни товщини заготовки в її різних перетинах від її межі текучості і товщини, зусилля гнуття і коефіцієнту тертя. Наведено результати виробничих експериментів із гнуття дуг пасажирських вагонів при вигині і вигині з розтягуванням. Встановлено вплив схеми навантаження у процесах гнуття, відтяжки і формовки на різностінність одержуваних деталей. При згинанні з розтягуванням різностінність мінімальна, коли зусилля розтягування компенсує дію сил тертя. При згинанні з розтягуванням і формуванні по зміні товщини заготовки визначено коефіцієнт тертя між пуансоном і заготовкою.

**Ключові слова:** гнуття, розтягування, тертя, дуга.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Для оценки влияния технологических факторов на процесс формоизменения заготовки необходимо знать характер изменения напряжений и деформаций и допустимые степени формоизменения. В некоторых случаях к штампуемым деталям предъявляются дополнительные требования, например, по разнотолщинности, минимальной (максимальной) толщине, размерам зерна, качеству поверхности и др. Установлено, что на характер развития деформаций и на предельную пластичность материала заготовки влияет схема напряженного состояния. Степень влияния схемы напряженного состояния на предельные деформации позволяют оценить многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, выполненные при различных схемах нагружения заготовок в очаге деформации [1]. Охарактеризовать схему напряженного состояния можно с использованием показателей схемы напряженного состояния В.А. Огородникова, И.А. Сивака, С.А. Губкина, Г.А. Смирнова-Аляева и др.

Для оценки деформируемости металлов необходимо знать напряженно-деформируемое состояние в очаге деформации, а также зависимость пластичности металлов от вида напряженного состояния и истории деформирования [1]. Среди множества показателей напряженного состояния предпочтение отдается показателям, в которые входят инварианты тензора напряжений или их функции [1, 2].

При производстве ответственных листовых деталей в большинстве случаев предпочтение отдается процессам, обеспечивающим минимальную разнотолщинность детали [3]. Обеспечение равномерного распределения утонений детали по ее сечению позволяет уменьшить исходную толщину заготовки и достигнуть ее наибольшую прочность и долговечность. Тот или иной процесс формоизменения оценивается показателем схемы напряженного состояния.

Глубокий и детальный анализ и обзор исследований по зависимости пластичности от схемы напряженного состояния, истории деформирования, градиента деформаций выполнен в работе Огородникова В.А. [1].

Огородниковым В.А. разработана методика построения кривых течения стали 08кп [1]. Для определения предельных параметров деформирования необходимо, помимо диаграмм пластичности, располагать диаграммами устойчивости металлов. В случае объемного напряженного состояния отражать влияние схемы напряженного состояния на пластичность предпочтительно показателем [1].

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3 I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}}{\sigma_u}, \quad (1)$$

где  $I_2(D_\sigma)$  – второй инвариант девиатора напряжений;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;  $\sigma_u$  – интенсивность напряжений.

Для плоского напряженного состояния диаграмма пластичности (зависимость степени деформации от показателей напряженного состояния) [1] строится в координатах

$$\varepsilon_p = \chi(\eta_1), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_p$  – предельная деформация;  $\eta_1 = (\sigma_1 + \sigma_2) / \sigma_u$  – показатель напряженного состояния.

При плоском напряженном состоянии  $\eta_3 = 0$  его удобно использовать для оценки объемности напряженного состояния с коэффициентом чувствительности пластичности к изменению схемы напряженного состояния –  $\lambda$ .

В качестве критерия оценки пластичности металла при плоском напряженном состоянии и зависимости пластичности от схемы напряженного состояния целесообразно использовать показатель напряженного состояния, предложенный И.А. Сиваком [1], когда среднее напряжение равно нулю  $\sigma_2 = 0$ :

$$\eta = \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad (3)$$

а в случае, когда имеет место плоское сжатие

$$\eta = \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – показатель напряженного состояния;  $\mu_\sigma$  – параметр Надом Лоде.

Интенсификация и совершенствование процессов гибки и обтяжки связана с дифференцированным нагревом или дополнительным нагружением заготовки.

Совершенствование и интенсификация процессов листовой штамповки наиболее эффективно достигается при "температурной и силовой интенсификации" [1]. К "температурной интенсификации" относят процессы формоизменения с нагревом, с дифференцированным нагревом, в состоянии сверхпластичности, электропластичности и вибропластичности. "Силовая интенсификация" реализуется при совмещенных процессах формоизменения. Эти направления в большинстве случаев более эффективны, чем другие направления расширения технологических возможностей и повышения однородности пластической деформации операций обработки металлов давлением [2], а именно: оптимизация формы инструмента и заготовки; управление силами контактного трения путём улучшения смазочных материалов, применения антисмазок и тормозящих сред и элементов; высокоскоростная и импульсная штамповка, виброштамповка и штамповка с использованием ультразвуковых колебаний. Учитывая, что в настоящее время приоритет в области обработки давлением удерживают методы холодной штамповки, то предпочтение следует отдавать совмещенным

процессам ("силовой интенсификации").

К совмещенным относят процессы, в которых заготовка деформируется под действием нескольких одновременно приложенных нагрузок, а итоговое формоизменение складывается из формоизменений, характерных для различных операций [2]. Совмещение нескольких различных операций в одном штамповом переходе позволяет решить комплекс технологических, производственных, экономических и конструкторских задач.

Число схем и способов интенсификации этих процессов чрезвычайно велико. В настоящее время выполнен обширный теоретический и экспериментальный анализ способов интенсификации процессов гибки и обтяжки [2, 3], однако методы перебора различных схем нагружения не дают объективной информации по эффективности способов и связаны с значительными материальными затратами. Поэтому существует необходимость в разработке метода оценки способов интенсификации процессов гибки и обтяжки. Исходя из этого, можно сформулировать цель исследования.

Цель исследования – разработка экспериментального и аналитического методов оценки эффективности способов интенсификации процессов гибки, обтяжки и формовки из условия равновесия сил, действующих на элемент заготовки.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Остановимся на изгибе с дополнительным нагружением профильных заготовок. Результаты исследования к изложенному подходу не затруднительно перенести и на процессы обтяжки.

Возможны следующие варианты последовательности нагружения [3]:

- 1) растяжение – изгиб (Р – И);
- 2) изгиб – растяжение – изгиб (И – Р – И);
- 3) растяжение + изгиб (Р + И).

В данном случае растяжение и изгиб действуют одновременно.

Схема процесса и расчетная схема представлены на рис. 1 и 2.

Эффективность процесса оцениваем по минимальной разнотолщинности заготовки. Этот показатель связан с минимизацией напряжений контактного трения, следовательно, определяет и качество получаемых деталей [4]. Этот метод наиболее прост, точен и превосходить зарубежные аналоги.

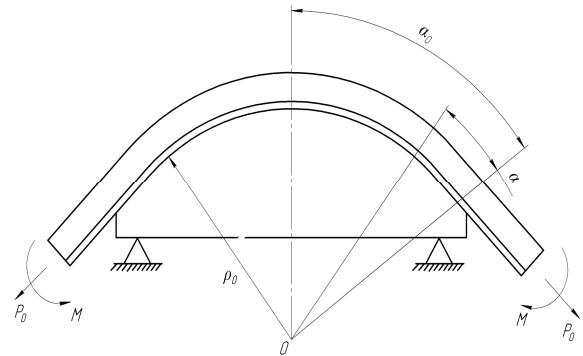


Рисунок 1 – Схема нагружения при изгибе с растяжением

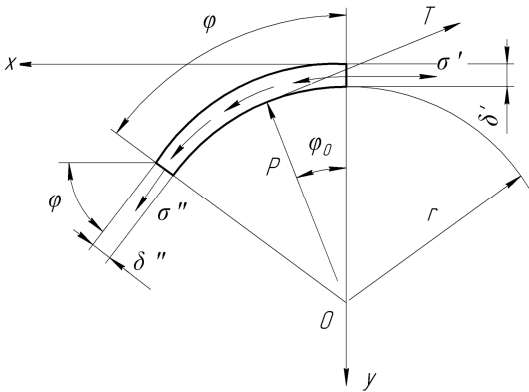


Рисунок 2 – Расчётная схема нагружения при изгибе с растяжением

Рассмотрим вариант Р – И. В этом случае заготовка подвергается растяжению вне контакта с пуансоном. Разнотолщинность заготовки отсутствует, а ее исходная толщина уменьшается на величину  $\Delta$  при интенсивности деформаций  $\varepsilon_i^0 = \ln \frac{\delta_0}{\delta_0 - \Delta}$  с остаточным напряжением  $\sigma^0$ .

Кривую истинных напряжений аппроксимируем степенной функцией с использованием логарифмических деформаций

$$\sigma_i = \sigma_s \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_{uu}}\right) \cdot \exp(\delta_{uu}), \quad (5)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести материала;  $\delta_{uu} = \ln \frac{l_{uu}}{l_0}$

– логарифмическая деформация удлинения до начала образования шейки при испытании на растяжения;

$\delta = \ln \frac{l}{l_0}$  – логарифмическая деформация.

Учитываем, что при изменении  $\delta$  от  $\delta = \delta_{uu}$  до  $\delta = 2\delta_{uu}$  на участках квазиустойчивой деформации можно принять  $(\delta/\delta_{uu})^{\delta_{uu}} \approx 1$ .

Кроме того, без большого ущерба для точности можно заменить экспоненциальную функцию первыми членами разложения в ряд Тейлора по соотношению, т.е.  $\exp(\delta) \approx 1 + \delta$ , а логарифмическую деформацию относительной.

Рассмотрим элемент образца, ограниченный сечениями АА и ББ (рис. 1), находящийся в соприкосновении с пуансоном.

Этот элемент отдельно показан на рис. 2.

Из условия равновесия сил, действующий на рассматриваемый элемент с шириной, равной единице, следует [4]

$$\sum_{ix} = \sigma'' \delta'' \cos \varphi - \sigma' \delta' - T \cos \varphi_0 + P \sin \varphi_0 = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{iy} = \sigma'' \delta'' \sin \varphi - T \sin \varphi_0 - P \cos \varphi_0 = 0 \quad (7)$$

$$\sum M_0 = \sigma'' \delta'' - \sigma' \delta' - T = 0, \quad (8)$$

где  $\delta', \delta''$  – толщина элемента на концевых участках в деформированном состоянии;

$P$  – равнодействующая нормального компонента усилия, передаваемая пуансоном на элемент образца;

$T$  – равнодействующая силы трения;

$\varphi$  – половина угла охвата;

$\varphi_0$  – координата, определяющая напряжение силы  $P$ ;

$\sigma', \sigma''$  – нормальные напряжения, которые определяются из диаграммы растяжения.

Тогда

$$\sigma' = \sigma_s \cdot \exp(\delta') \approx \sigma_s (1 + \delta') \approx \sigma_s \left(1 + \frac{\delta' - \delta_0}{\delta_0}\right) \approx \sigma_s \cdot \frac{\delta'}{\delta_0}, \quad (9)$$

$$\sigma'' \approx \sigma_s \cdot \delta'' / \delta_0, \quad (10)$$

где  $\delta_0$  – исходная толщина заготовки.

Уравнение (8) преобразуется к виду

$$\frac{\sigma_s}{\delta_0} [(\delta'')^2 - (\delta')^2] \approx T = fP. \quad (11)$$

Уравнение в явном виде выражает зависимость изменения квадрата толщины заготовки от предела текучести материала, его толщины, деформирующего усилия и коэффициента трения.

При предварительном растяжении заготовки (Р – И), исходная толщина заготовки уменьшается, предел текучести повышается. Следовательно, в этом случае разнотолщинность детали уменьшается. Кроме того, при пластическом контакте коэффициент трения с увеличением  $\sigma_s$  (сопротивление деформирования материала в зоне контакта) уменьшается [3].

При одновременном действии изгиба с растяжением в уравнении (4) добавится усилие  $P_p$ , которое частично компенсирует силу трения. В результате этого разница  $(\delta'')^2 - (\delta')^2$  уменьшается, а следовательно уменьшится разнотолщинность детали.

При изгибе разнотолщинность увеличивается от торца заготовки к центру изгиба.

При действии растягивающего усилия (обтяжка по пуансону) силы трения будут возрастать в противоположном направлении сил трения при изгибе, т.е. от торца заготовки к центру изгиба.

В результате этого разнотолщинность детали уменьшится. В тоже время при действии сжимающего усилия разнотолщинность детали увеличится.

При нагружении в последовательности (Р–И–Р) на заключительной стадии, как это имело место в предыдущем случае можно полностью исключить разнотолщинность детали, если сила растяжения будет

$$P_p = P_{dep} + T, \quad (12)$$

где  $P_{dep}$  – усилие деформирования заготовки.

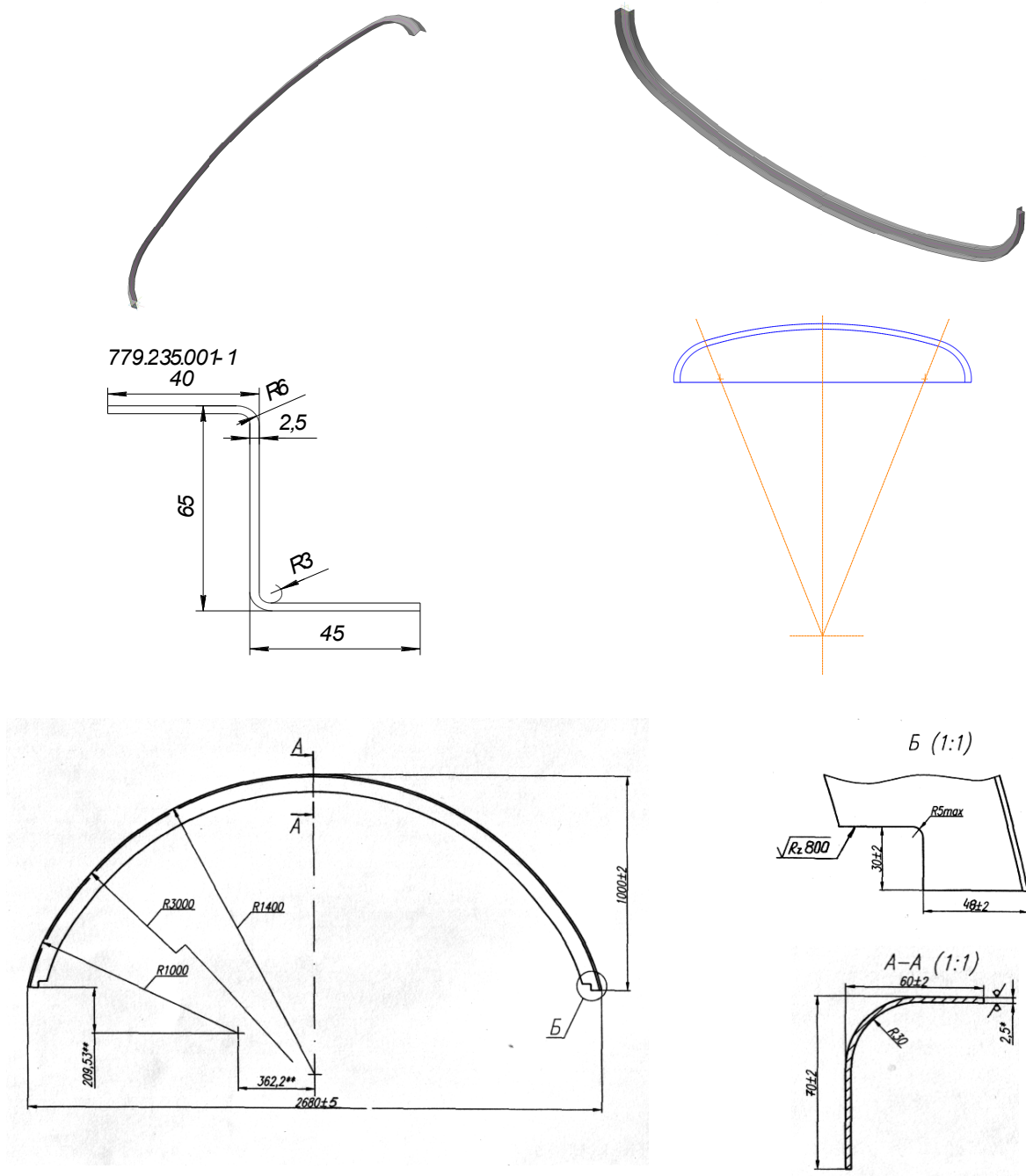


Рисунок 3 – Типичные представители дуг пассажирских вагонов

Таблица 1 – Результаты измерений толщины деталей

Деталь	Схема процесса	Толщина заготовки				Относительные деформации		Разностенность $\frac{\delta_A - \delta_D}{L}$
		А	В	С	Д	$\Delta_A$	$\Delta_D$	
Дуга 779.235001-1 АО «КВСЗ»	И	2,08	1,89	1,8	1,52	0,168	0,392	$3,1 \cdot 10^{-4}$
	И – Р	1,80	1,70	1,70	1,40	0,28	0,44	$2,2 \cdot 10^{-4}$
	И + Р	1,80	1,72	1,72	1,44	0,28	0,384	$2,0 \cdot 10^{-4}$
	Р – И – Р	1,54	1,54	1,54	1,50	0,144	0,4	$2,2 \cdot 10^{-5}$

Следует учитывать, что при изготовлении деталей с переменным радиусом кривизны на участках малого радиуса ( $r < 5 \delta_0$ ) возникает дополнитель-

ный изгибающий, увеличивающий силу нормального давления, а, следовательно, и силу трения, что приводит к увеличению разностенности.

Для подтверждения этих данных были проведены производственные эксперименты по гибке дуг пассажирских вагонов рис. 3 по схемам И, Р – И, И + Р, Р – И – Р.

Результаты измерений после статической обработки и расчетов приведены в табл. 1:

$\delta_A, \delta_D$  – толщина детали в точках А и Д.

$L$  – длина дуг между точками А и Д.

Коэффициент трения, определенный по разнице толщин соответствовал значениям, полученным в статье Козакова [4]. В данном исследовании удалось в рамках силового анализа без расчёта напряжённо-деформированного состояния установить наиболее эффективные схемы формоизменения. Это менее затратно для технологов, но требует творческого и индивидуального подхода к процессам формообразования.

Растягивающее усилие при котором разностенность детали практически равна нулю для стали 08кп составит

$$P_{расм} = T = f \cdot P = 17440 \text{ Н.}$$

Уточнение полученных результатов в том числе и коэффициента трения возможно при замене сосредоточенных усилий – распределенными.

Результаты исследований можно использовать для производства дуг пассажирских вагонов при незначительной доработке оборудования имеющегося на АО «КВСЗ».

**ВЫВОДЫ.** В результате проведенных исследований установлено влияние схемы приложения деформирующего и дополнительного нагружения в процессах формоизменения листовых заготовок

(гибка, обтяжка, формовка) на разностенность получаемых деталей, при гибке с предварительным, последовательным и одновременным растяжением. При усилении растяжения, компенсирующим действие сил трения получены детали не имеющие разностенности. При гибке с растяжением по изменению толщины заготовки можно непосредственно определить коэффициент трения между заготовкой гибочным пуансоном.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.

2. Ершов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1980. – 312 с.

3. Zagirniak, M., Dragobetsky, V., Moroz, N., Zagirniak, V. (2010) "Choice of optimum parameters of deformation of sheet stock forming in the process of drawing", *Transactions of Kremenchuk Myhailo Ostrogradskiy State University*, Kremenchuk: KSU, no. 1 (60), part 1, pp.108 – 111.

4. Козаков Ю.П. Способ определения коэффициента трения при пластическом течении листовых металлов // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1972. – № 5. – С. 20–21.

5. Agueyv, N.P., Zateroukha, E.V. (2012) "Engineering method for Prediction of Stamped Parts", *Mechanical Forging and stamping production. Material working by Pressure*, no. 8, pp. 13–18.

#### THE INFLUENCE OF LOADING DIAGRAM ON THE RADIAL-DRAW FORMING PROCESS

V. Cherkashenko, A. Chernysh, A. Voronin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

The paper considers the bending processes with additional load at a sequential loading. The research of the dependence of plasticity on the scheme of the stressed state was analyzed. The estimation of the bending efficiency was made without calculation of the stressed-deformed state of a work piece. According to the balance conditions of the work piece element, it was obtained the equation expressing dependence of thickness of the work piece in its different sections on its bending force fluctuation, thickness limits and the friction coefficient. In the paper, the authors have presented results of industrial experiments for the coaches carline radial-draw forming at their bending and tensile with bending. It was determined the influence of the loading diagram during the bending, drawing and forming processes onto the wall thickness variation of the work pieces produced. Minimum of the wall thickness variation at radial-draw forming occurs when the tensile stress compensates the friction forces action. At radial-draw forming and stamping the coefficient of friction between the punch and the blank is determined by the change of the thickness of the blank.

**Key words:** bending, tension, friction, carline.

#### REFERENCES

1. Ogorodnikov, V.A. (1983), *Ocenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem* [Estimation of metal deformation under pressure processing], Vyshcha shkola, Kyiv, Ukraine.

2. Yershov, V.I., Glazkov, V.I., Kashirin, M.F. (1980), *Sovershenstvovanie formoizmenyushih operaciu listovou shtampovki* [Perfection of form-changing operations of sheet-metal stamping], Mashinostroenie, Moscow, Russia.

3. Zagirniak, M., Dragobetsky, V., Moroz, N., Zagirniak, V. (2010), "Choice of optimum parameters of deformation of sheet stock forming in the process of

drawing", *Transactions of Kremenchuk Myhailo Ostrohradskiy National University*, no. 1 (60), part 1, pp. 108–111.

4. Kozakov, Yu. P. (1972), "The method of friction coefficient determination with plastic friction of sheet metals", *Press and Forging Production. Metal Processing by Pressure*, no. 5, pp. 20–21, Russia.

5. Agueyv, N.P., Zateroukha, E.V. (2012), "Engineering method for Prediction of Stamped Parts", *Mechanical Forging and stamping production. Material working by Pressure*, no. 8, pp. 13–18, Russia.

Стаття надійшла 28.11.2013.