

УДК 621.73.046

В.В. Кухарь к.т.н., доцент

Приазовский государственный технический университет (ПДТУ, Мариуполь),  
Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ, Днепропетровск)

## ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБОМ ЗАГОТОВОК С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

*Досліджено процеси поздовжнього згинання заготовок із круглою, прямокутною та трубчастою формою поперечного перерізу з точки зору профілювання під штамповані вироби із зігнутою віссю. Шляхом регресійного аналізу експериментальних даних із визначення геометричної нерівномірності деформації заготовок прямокутного і трубчастого поперечного перерізу та викривлення торців заготовок круглого поперечного перерізу отримані аналітичні залежності запропонованих критеріїв формозміни від ступеня деформації та співвідношень геометричних розмірів вихідних заготовок.*

*Processes of longitudinal bending of billets with round, rectangular and tube shape of cross-sections was researched in the point of view of prepared profiling for producing of forged parts with bended axle. By the way of regress analyzing of experiences results from determinate of geometric irregularity of deformation of billets with rectangular and tube cross-sections and buckling of ends parts of billets with round sections was received an analytical dependents of proposed index of shape forming from deformation degree and relations of geometric dimensions of setting billets.*

Процессы предварительного профилирования заготовок перед последующей штамповкой направлены на приближение формы заготовки к конфигурации штампуемого изделия. Рациональность профилирования подтверждается снижением расхода металла, повышением стойкости гравюр штампов, уменьшением энергосиловых затрат при штамповке, улучшением показателей качества изделий и другими положительными явлениями [1–3]. Достаточно часто возникает необходимость выполнить производственные заказы на штамповку поковок такого типа, который не является предпочтительным для установленного в цехе основного штамповочного оборудования. Это делает малоэффективными стандартные подготовительно-заготовительные профилирующие ручьи и выдвигает требования использования дополнительного профилирующего оборудования (ковочных вальцов, станов поперечно-винтовой прокатки и т.п.), что экономически целесообразно только в случаях крупносерийного и массового производства [4, 5].

Повышение технико-экономических показателей производства возможно путем применения бесштамповых способов профилирования заготовок под последующую штамповку [6], когда максимально используют особенности свободного формоизменения заготовки при её деформировании инструментом максимальной простой конфигурации. Согласно разработанной концепции [6], к бесштамповым способам профилирования заготовок перед последующей штамповкой можно отнести процессы, основанные на сжатии (осадке), растяжении и продольном изгибе заготовок. Продольному изгибу подвергают заготовки с различной формой поперечного сечения: круглого [7], квадратного или прямоугольного [8], трубчатого [9].

Явление продольного изгиба возникает при потере устойчивости осаживаемых цилиндрических заготовок, когда отношение исходной высоты ( $H_0$ ) к диаметру ( $D_0$ ) заготовки превышает некоторое критическое значение. Следует отметить наличие глубоких теоретических исследований напряженного состояния стержневых систем, целью которых было определение предельных нагрузок, приводящих к потере продольной устойчивости [10]. Подойдя вплотную к вопросам изучения пластического продольного изгиба, большинство исследователей рассматривало методики уточнения критических отношений  $H_0/D_0$ , при этом разброс данных значений, определенных различными методами, находится в пределах от 1,7 до 3,2.

В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований осадки с продольным изгибом заготовок круглого поперечного сечения установлены основные закономерности формоизменения, включающего изгиб и перераспределение металла, на основе которых разработаны методики расчета и усовершенствованы технологические процессы штамповки поковок с изогнутой осью [7]. Однако деформации торцевых участков должны быть регламентированы с точки зрения обеспечения локального объема металла, достаточного для заполнения отростков поковки в окончательном ручье, что требует нахождения расчетных зависимостей для прогнозирования искажений. Также отсутствует аналитическое описание изменения критериев формоизменения при продольном изгибе заготовок прямоугольного и трубчатого поперечного сечения, что затрудняет развитие способов профилирования и разработку методик расчета заготовок и переходов штамповки.

Целью работы является изучение геометрического формоизменения заготовок прямоугольного и трубчатого поперечного сечения и аналитическая оценка искажения торцевых участков заготовок круглого поперечного сечения при профилировании продольным изгибом.

В качестве критерия, характеризующего формоизменение заготовки при профилировании, может быть принята величина работы, которую необходимо затратить для осуществления перераспределения металла. По мнению ряда известных ученых (А.Н. Брюханова, Я.М. Охрименко, А.В. Ребельского, М.В. Сторожева, Е.И. Семенова и др.), величина такой работы пропорциональна отношению максимальной площади поперечного сечения профилированной заготовки к средней её площади, определяемой делением объема на длину заготовки или её развертки. Данную величину часто называют коэффициентом подкатки применительно к оценке сложности штампуемой поковки удлиненной или изогнутой конфигурации [1]. При этом осуществляют выбор заготовительных переходов, т.е. оценивают степень профилирования. Для оценки неравномерности деформации в продольном, поперечном и высотном направлении приняты безразмерные соотношения наиболее значимых контролируемых размеров с одним из первоначальных размеров заготовки. Данные

безразмерные соотношения, определяемые по результатам замеров, нетрудно привести к показателям, принятым для критериальной оценки профилирования.

Анализ формоизменения выполняли путем проведения опытов согласно планам двухуровневых полных факторных экспериментов с построением регрессионных математических моделей [11]. Контролируемые размеры замеряли согласно схемам продольного изгиба заготовок трубчатого (рис. 1), прямоугольного (рис. 2) и круглого (рис. 3) поперечного сечения.

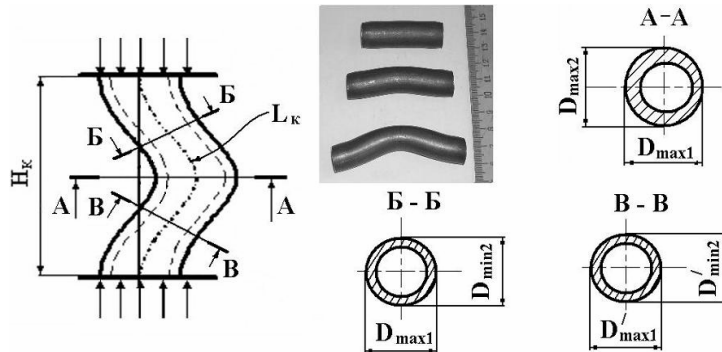


Рис. 1. Схема продольного изгиба трубчатых заготовок

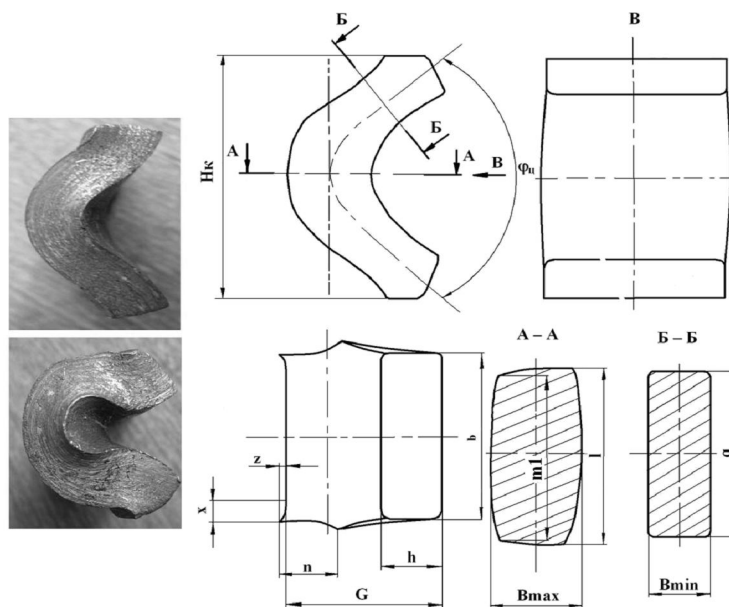


Рис. 2. Схема продольного изгиба заготовок прямоугольного поперечного сечения:  
 $\phi_n$ ;  $H_k$ ;  $x$ ,  $z$ ,  $n$ ,  $h$ ,  $G$ ,  $b$ ,  $m_1$ ,  $q$ ,  $B_{max}$ ,  $B_{min}$  – контролируемые размеры

Трубчатые экспериментальные образцы изготавливали из латуни марки Л92, наружный диаметр  $D_0 = 14$  мм, высота  $H_0 = 56$  мм, 70 мм и 84 мм, толщина стенки  $S_0 = 2,5$  и 4 мм. Соответственно относительная высота  $m = H_0/D_0 = 4,0$ ; 5,0 и 6,0, а  $S_0/D_0 = 0,18$  и 0,29. Опытные образцы прямоугольного и круглого поперечного сечения изготавливали прессованием из слитков свинцово-сурьмянистого сплава ССу ГОСТ 1292-81Е с коэффициентом вытяжки  $> 3$  для разрушения внутренней литой структуры и проводили их дальнейшую разрезку по размеру. Для исключения влияния продольного размера заготовок пластин на показатели неравномерности деформации исходные образцы имели отношение длины ( $L_0$ ) к ширине ( $B_0$ ) свыше 3,0. Относительную высоту варьировали в пределах от  $m = H_0/B_0 = 80/23 = 3,5$  до  $m = 80/9,8 = 7,0$ . При изготовлении цилиндрических образцов  $D_0 = 25$  мм их отрезали от прессованного прутка с длиной  $H_0 = 100$  мм; 125 мм и 150 мм, т.е. относительная высота  $m = H_0/D_0 = 4,0$ ; 5,0 и 6,0 соответственно.

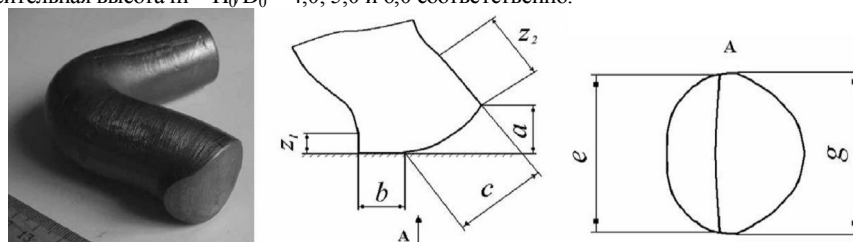


Рис. 3. Продольный изгиб заготовки круглого поперечного сечения и схема искажения торцевых участков:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $e$  – контролируемые линейные размеры

Осадку с продольным изгибом осуществляли на универсальной испытательной машине УММ-10 (паспортная сила деформирования 10 кН). Использовали плоско-параллельные осадочные плиты из стали 5ХНВ ГОСТ 5960-74 термообработанные до HRC 40...44 с шероховатостью поверхности Ra = 0,63 мкм. В качестве показателя степени деформации при продольном изгибе выбрано отношение  $\varepsilon_y = [(H_0 - H_k)/H_0]$ , где  $H_k$  – высота изогнутого образца после деформирования. Для трубчатых заготовок предварительно определяли критические значения  $\varepsilon_{y,кр}$ , соответствующие началу овализации поперечного сечения, по расчетным зависимостям работы [11]:

$$\text{- при } S_0/D_0 = 0,18 \rightarrow \varepsilon_{y,кр(0,18)} = 0,008m^2 - 0,0888m + 0,4592 ;$$

$$\text{- при } S_0/D_0 = 0,29 \rightarrow \varepsilon_{y,кр(0,29)} = 0,0091m^2 - 0,1062m + 0,5466 .$$

Исследования проводили в диапазоне  $\varepsilon_y/\varepsilon_{y,кр} = 0,2 - 1,0$ . Для заготовок прямоугольного и круглого сечения диапазон исследований был разбит на три степени деформации осадки:  $\varepsilon_y = 0,14; 0,34$  и  $0,54$ . Гибкой измерительной лентой проводили замеры длины оси ( $L_k$ ) изогнутых заготовок всех типов и определяли относительное укорочение  $\delta = [(H_0 - L_k)/H_0]$ . Для возможности проведения статистической обработки изготавливали и осаживали по три экспериментальных образца на каждые  $m$  и  $\varepsilon_y$ .

Из условия симметричного протекания формоизменения в верхней и нижней частях изогнутых образцов выполняли усреднение парных контролируемых размеров. Проводили вычисление безразмерных критериев формоизменения:

- для трубчатых заготовок:

$$k_{\max} = [(D_{\max 1} + D_{\max 2})/2]/D_0 ; k_{\min} = [(D_{\min 1} + D_{\min 2} + D'_{\min 1} + D'_{\min 2})/4]/D_0 , (1)$$

- для заготовок прямоугольного поперечного сечения:

$$K_{no} = \frac{B_{\max}}{B_0/(1-\delta)} ; k_1 = \frac{B_{\max}}{B_0} ; k_2 = \frac{B_{\min}}{B_0} ; k_3 = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} ,$$

- для искажения торцевых участков заготовок круглого поперечного сечения:

$$a/D_0 ; b/D_0 ; c/D_0 ; z_1/D_0 ; z_2/D_0 ; g/D_0 ; e/D_0 . (3)$$

Количественное описание факторного пространства для трубчатых заготовок приведено в табл. 1, для заготовок прямоугольного сечения – в табл. 2, для заготовок круглого сечения – в табл. 3. Предварительные опытные данные позволили ограничить построение функций поверхностей откликов линейными моделями при дифференциации факторного пространства.

Таблица 1

#### Факторы и их уровни при регрессионном описании критериев формоизменения трубчатых заготовок

Факторы в интервале $m = 4,0 - 5,0$ (Обозначение)	$m$ (x1)	$S_0/D_0$ (x2)	$\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{y,\dot{\varepsilon}\delta}}$ (x3)	Факторы в интервале $m = 5,0 - 6,0$ (Обозначение)	$m$ (x1)	$S_0/D_0$ (x2)	$\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{y,\dot{\varepsilon}\delta}}$ (x3)
Основной уровень	4,5	0,235	0,6	Основной уровень	5,5	0,235	0,6
Интервал варьирования	0,5	0,055	0,4	Интервал варьирования	0,5	0,055	0,4
Верхний уровень	5,0	0,29	1,0	Верхний уровень	6,0	0,29	1,0
Нижний уровень	4,0	0,18	0,2	Нижний уровень	5,0	0,18	0,2

Таблица 2

#### Факторы и их уровни при регрессионном описании критериев формоизменения заготовок прямоугольного поперечного сечения

Факторы в интервале $m = 3,5 - 6,0$ (Обозначение)	$m$ (x1)	$\varepsilon_y$ , отн. ед. (x2)	Факторы в интервале $m = 6,0 - 8,0$ (Обозначение)	$m$ (x1)	$\varepsilon_y$ , отн. ед. (x2)
Основной уровень	4,75	0,33	Основной уровень	7,0	0,34
Интервал варьирования	1,25	0,2	Интервал варьирования	1,0	0,2
Верхний уровень	6,0	0,53	Верхний уровень	8,0	0,54
Нижний уровень	3,5	0,13	Нижний уровень	6,0	0,14

**Факторы и их уровни при регрессионном описании искажения торцевых участков заготовок круглого поперечного сечения**

Факторы в интервале $m = 4,0-5,0$ (Обозначение)	$m$ (x1)	$\varepsilon_y$ , отн. ед. (x2)	Факторы в интервале $m = 5,0-6,0$ (Обозначение)	$m$ (x1)	$\varepsilon_y$ , отн. ед. (x2)
Основной уровень	4,5	0,34	Основной уровень	5,5	0,34
Интервал варьирования	0,5	0,2	Интервал варьирования	0,5	0,2
Верхний уровень	5,0	0,54	Верхний уровень	6,0	0,54
Нижний уровень	4,0	0,14	Нижний уровень	5,0	0,14

Общий вид полинома, описывающего регрессионные зависимости критериев формоизменения от влияющих технологических факторов при продольном изгибе трубчатых заготовок:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (4)$$

где  $Y$  – контролируемые критерии формоизменения по формуле (1);

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – искомые коэффициенты уравнений регрессии;

$X_1 = (m - 4,5)/0,5$  и  $X_1 = (m - 5,5)/0,5$  – кодированные значения фактора относительной высоты для интервалов  $m = 4,0-5,0$  и  $m = 5,0-6,0$  соответственно;

$X_2 = (S_0 / D_0 - 0,235)/0,055$  и  $X_3 = (\varepsilon_y / \varepsilon_{y,\text{до}} - 0,6)/0,4$  – кодированные обозначения факторов, характеризующих влияние толщины стенки и условной степени деформации.

Общий вид полинома, описывающего регрессионные зависимости критериев формоизменения от влияющих факторов при продольном изгибе заготовок прямоугольного и круглого поперечного сечения:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (5)$$

где  $Y$  – контролируемые критерии формоизменения по формулам (2) и (3);

$X_2 = (\varepsilon_y - 0,34)/0,2$  – кодированное значение фактора, характеризующего влияние условной степени деформации при продольном изгибе.

При этом для заготовок прямоугольного поперечного сечения кодированные значения фактора относительной высоты для интервалов  $m = 3,5 - 6,0$  и  $m = 6,0 - 8,0$  составляют  $X_2 = (m - 4,75)/1,25$  и  $X_2 = (m - 7,0)/1,0$  соответственно.

Для заготовок круглого сечения кодированные значения фактора относительной высоты в интервалах  $m = 4,0 - 5,0$  и  $m = 5,0 - 6,0$  составляют  $X_2 = (m - 4,5)/0,5$  и  $X_2 = (m - 5,5)/0,5$  соответственно.

В результате проведения экспериментов и выполненных расчетов получены количественные оценки коэффициентов уравнений регрессии (4) и (5) для различных критериев формоизменения (1) – (3), представленные в табл. 4 и табл. 5.

Таблица 4

**Значения коэффициентов уравнения регрессии (4) для расчета критериев формоизменения трубчатых заготовок при профилировании продольным изгибом**

$Y$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
$m = 4,0 - 5,0$								
$k_{\max} \cdot 100$	106,973	-0,773	4,0467	1,112	-0,229	-0,116	0,096	-0,428
$k_{\min} \cdot 100$	104,495	-0,486	3,611	0,135	-0,3197	0,064	-0,029	-0,069
$\delta \cdot 100$	9,727	-1,774	5,426	1,074	-1,075	-0,076	0,725	-0,125
$m = 5,0 - 6,0$								
$k_{\max} \cdot 100$	104,648	-1,547	2,633	1,048	-1,188	0,042	-0,045	0,296
$k_{\min} \cdot 100$	103,621	-0,388	3,128	0,787	-0,164	0,588	0,612	0,711
$\delta \cdot 100$	6,192	-1,754	3,228	0,5899	-1,115	-0,406	0,223	-0,374

Значения коэффициентов уравнения регрессии (5) для расчета критериев формоизменения заготовок прямоугольного и круглого поперечного сечения

Y	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>12</sub>	Y	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>12</sub>
Заготовки прямоугольного сечения									
m = 3,5 – 6,0					m = 6,0 – 8,0				
$K_{no} \cdot 100$	114,53	12,13	9,83	8,22	$K_{no} \cdot 100$	119,59	-7,07	11,77	-6,28
$k_1 \cdot 100$	129,75	4,78	18,61	3,77	$k_1 \cdot 100$	127,26	-7,29	16,42	-5,98
$k_2 \cdot 100$	125,83	-8,27	16,58	-6,62	$k_2 \cdot 100$	110,16	-7,41	5,25	-4,71
$k_3 \cdot 100$	106,74	13,26	7,09	2,91	$k_3 \cdot 100$	111,83	-8,18	5,58	-4,43
$\delta \cdot 100$	11,21	-5,61	6,33	-3,94	$\delta \cdot 100$	6,28	0,67	0,95	-1,45
$\varphi^0$	125,46	-29,5	-39,04	-21,96	$\varphi^0$	90,85	-5,15	-60,55	0,45
Заготовки круглого сечения									
m = 4,0 – 5,0					m = 5,0 – 6,0				
$(a/D_0) \cdot 100$	25,53	16,03	19,93	11,43	$(a/D_0) \cdot 100$	54,9	13,35	34,2	2,85
$(b/D_0) \cdot 100$	70,63	-14,9	-2,13	-7,63	$(b/D_0) \cdot 100$	43,98	-11,8	-7,32	2,43
$(c/D_0) \cdot 100$	54,08	23,07	18,58	4,57	$(c/D_0) \cdot 100$	85,95	8,8	19,2	-3,95
$(z_1/D_0) \cdot 100$	38,0	-9,0	-27,5	7,5	$(z_1/D_0) \cdot 100$	24,91	-4,1	-17,9	2,1
$(z_2/D_0) \cdot 100$	96,0	10,0	14,0	0	$(z_2/D_0) \cdot 100$	121,0	15,0	-13,0	1,0
$(g/D_0) \cdot 100$	110,1	-2,48	4,48	-1,06	$(g/D_0) \cdot 100$	104,92	-2,67	1,34	-2,09
$(e/D_0) \cdot 100$	100,82	-6,92	-0,88	-5,63	$(e/D_0) \cdot 100$	85,2	-8,7	-9,75	-3,25

В процессе построения уравнений регрессии выполняли дисперсионный анализ с оценкой воспроизводимости результатов путем проверки по критерию Кохрена (G), табличное значение которого  $G_{табл} = 0,7679$ . Для заготовок круглого сечения максимальное расчетное значение  $G_p = 0,7375$  (при  $z_1/D_0$ ,  $m = 5,0 - 6,0$ ), прямоугольного сечения –  $G_p = 0,7107$  (при  $k_2$ ,  $m = 6,0 - 8,0$ ), трубчатого сечения –  $G_p = 0,4180$  (при  $\delta$ ,  $m = 4,0 - 5,0$ ), т.е. во всех случаях  $G_p < G_{табл}$ . При проверке значимости коэффициентов уравнений регрессии по критерию Стьюдента ( $t_{\alpha=0,95} = 2,31$ ) все коэффициенты оказались значимыми. Адекватность регрессионных моделей подтверждена проверкой по критерию Фишера (F), табличное значение которого  $F_{табл} = 5,32$ . Расчетные значения  $F_p$  находились в пределах  $0,7744 \div 3,4042$ , т.е.  $F_p < F_{табл}$ .

#### Вывод.

Профилирование заготовок продольным изгибом является перспективным и наименее изученным направлением формообразования заготовок вне гравюр штампов. На основе теории планируемого эксперимента получены регрессионные зависимости для расчета критериев формоизменения заготовок различного поперечного сечения, применимые для выполнения имитационного моделирования, проектирования переходов штамповки поковок типовой конфигурации и других многовариантных задач.

#### Список использованной литературы

1. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1966. – 599 с.
2. Бойцов Б. В. Повышение качества в кузнечно-штамповочном производстве / Б. В. Бойцов // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 2000. – № 7. – С. 6–9.
3. Володин И. М. Развитие основ проектирования ресурсосберегающих технологий горячей объемной штамповки / И. М. Володин // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2007. – С. 208–210.
4. Хмара С. М. Определение области рационального применения КГШП и ПШМ / С. М. Хмара, Н. Н. Мариюта, В. А. Алеев // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1970. – № 1. – С. 35–37.
5. Ипатов М. И. Рентабельность машиностроительной продукции при изменении объема продаж / М. И. Ипатов // Вестник машиностроения. – 1993. – № 2. – С. 59–61.
6. Гринкевич В. А. Разработка концепции бесштампового профилирования заготовок на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло // Вісник Національного технічного університету «ХП». Зб. наук. пр. - Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП» – 2009. – №32. – С. 26–32.
7. 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.
8. Диамантопуло К. К. Исследование формоизменения относительно высоких полос при профилировании осадкой с продольным изгибом // К.К. Диамантопуло, В.В. Кухарь // Обработка материалов давлением. - №1 (20), 2009. – С. 181-185.
9. Кухарь В. В. Предельная степень осадки с продольным изгибом трубных заготовок при производстве обводных патрубков / В. В. Кухарь, А. В. Грушко, Н. П. Еленич // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том XI. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Системні технології. – 2008. – С. 313-319.
10. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
11. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.