

УДК 621.77

Євстратов В. О.  
Левченко В. М.  
Калита В. С.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ В ПРОЦЕСАХ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ КОРОБОК

В умовах збільшення цін на матеріали та енергоресурси розвиток енерго- та металозаощаджувальних технологій стає все більш актуальним. Однією з таких технологій є холодне об'ємне штампування (ХОШ), що дозволяє отримати різноманітні деталі, які або зовсім не потребують механічного оброблення, або це оброблення незначне (у зв'язку з мінімальними припусками).

У різних галузях промисловості (машинобудуванні, приладобудуванні, електронній, радіотехнічній тощо) широко використовують порожнисті вироби прямокутної форми типу коробок з постійною і змінною по периметру товщиною стінки.

При видавлюванні деталей типу коробок деформація в кутових ділянках і в центральній зоні суттєво різна, що призводить до того, що швидкість течії металу в стінку стає змінною за довжиною коробки. Ось чому і висота стінки стає змінною за довжиною коробки, а це призводить до утворення так званих фестонів.

Складність теоретичного аналізу процесів видавлювання коробок утруднюється складною кінематикою течії металу, особливо в зонах, які розташовані у безпосередній близькості до кутів заготовки, де деформований стан не плоский, а тривимірний. Через це теоретичний аналіз цих зон дуже складний [1–4]. Такі задачі можливо розв'язувати лише за допомогою сучасної комп'ютерної техніки [5, 6]. Проте для теоретичного аналізу необхідно ясно уявляти собі особливості кінематики видавлювання деталей типу коробок.

Метою даної роботи було визначення характеру деформації та дослідження кінцевої формозміни, визначення висоти фестонів в залежності від основних чинників для наступного математичного моделювання процесу та оптимізації конструкції штампів.

Для кількісного оцінювання кінцевої формозміни приймали максимальну різницю висоти стінок за периметром коробки  $\Delta H$ . Аналіз різновисотності коробок, залежно від їхніх розмірів дозволив встановити, що найбільш суттєвими факторами, які впливають на висоту фестонів  $\Delta H$ , є наступні: відносна довжина коробки  $\bar{\alpha}$ , її ширина  $B$ , відносна товщина стінки  $\bar{S}$ , а також коефіцієнт тертя  $\mu$ . Крім того, попередні експерименти показали, що масштабний фактор практично не впливає на характер формозміни і висоту фестонів.

Це дозволило прийняти математичну модель процесу утворення фестонів у вигляді рівняння регресії такого виду

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{1,2} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{1,3} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{2,3} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{1,2,3} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (1)$$

де  $Y$  – залежна змінна, яка характеризує висоту стінки коробки за її периметром (фестон);

$x_1, x_2, x_3$  – основні фактори процесу видавлювання ( $x_1 = \bar{\alpha}$ ;  $x_2 = \bar{S}$ ;  $x_3 = \mu$ );

$b_{i,j,k}$  – параметри моделі.

Для визначення коефіцієнтів рівняння регресії було використано повний факторний експеримент типу  $2^3$ . Основні рівні факторів були вибрані з урахуванням розмірів коробок, які найчастіше використовують у виробництві, а інтервали варіювання – виходячи з реальних меж значень основних факторів (табл. 1).

Для визначення впливу масштабного фактору на величину  $\Delta H/B$  ширину коробки  $B$  варіювали в межах від 20 до 60 мм через кожні 20 мм. Як видно з табл. 1, значення факторів та інтервалів їхнього варіювання, охоплюють будь-які можливі комбінації розмірів коробок, що лежать в межах від  $20 \times 20$  до  $60 \times 240$  мм. Експерименти виконували у відповідності із стандартною матрицею планування (табл. 2). Для проведення експериментів був сконструйований і виготовлений дослідний штамп (рис. 1, 2).

Для варіювання факторів  $B$ ,  $\bar{\alpha}$  і  $\bar{S}$ , у відповідності з планом експерименту виготовили набір пуансонів и вставних елементів. Це дозволило легко переналагоджувати штамп і отримувати необхідні комбінації розмірів коробок в плані, а також і товщину стінки  $S$  (табл. 3).

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали їхнього варіювання

Рівні факторів	Позначення	Основні фактори процесу		
		$\bar{\alpha} = x_1$	$\bar{S} = x_2$	$\mu = x_3$
Верхній	+	4	0,35	0,4
Нижній	-	1	0,05	0,1
Основний	0	2,5	0,2	0,25
Інтервал варіювання	$\Delta x_i$	1,5	0,15	0,15

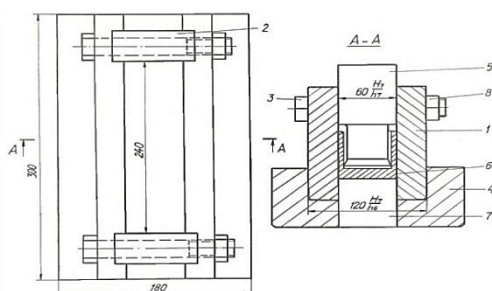


Рис. 1. Схема дослідного переналагоджуваного штампа:

1 – подовжня плита, 2 – поперечна плита, 3 – прогоничі, 4 – обойма, 5 – пуансон, 6 – коробка, 7 – виштовхувач, 8 – мутра (гайка)

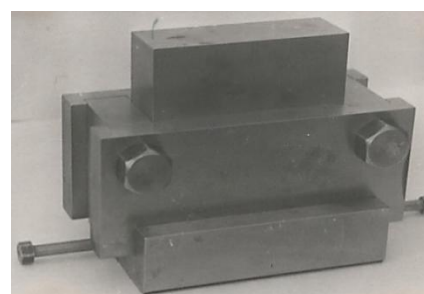


Рис. 2. Загальний вид штампа

Таблиця 2

Матриця планування  $2^3$  в кодіваних змінних

Номер точки плану	Порядок реалізації дослідів			Геометричні параметри (фактори) процесу								
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	
1	1	4	5	+	-	-	-	+	+	+	-	
2	3	3	7	+	+	-	-	-	-	+	-	
3	6	6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	
4	8	1	4	+	+	+	-	+	-	-	-	
5	7	8	6	+	-	-	+	+	-	-	+	
6	4	7	1	+	+	-	+	-	+	-	-	
7	2	5	3	+	-	+	+	-	-	+	-	
8	5	2	2	+	+	+	+	+	+	+	+	

Таблиця 3

Розміри коробок, які досліджували в експерименті

$B$		$A$			$\bar{S}$
20	20	40	60	80	0,05–0,35
40	40	80	120	160	0,05–0,35
60	60	120	180	240	0,05–0,35

Перед реалізацією плану було необхідно дослідити кінематику фестоноутворення в залежності від глибини порожнини. З цією метою були проведені досліди з поетапним деформуванням заготовок. Коробки (з розмірами в плані  $20 \times 80$  мм) видавлювали за шість етапів (рис. 4). Щоб забезпечити чистоту дослідів, для кожного етапу виготовляли таку ж само

окрему заготованку. На першому етапі видавлювали порожнину глибиною  $0,3b$ , на останньому – не менш  $1,5b$ , де  $b$  – ширина пуансону. Висоту  $\Delta H$  визначали як різницю між максимальним та мінімальним значеннями висоти коробки за її довгими сторонами (рис. 4). Значення  $\Delta H$  залежно від глибини занурення пуансона  $\Delta h$  у заготованку надані у табл. 4. За даними цієї таблиці методом найменших квадратів здійснили лінійну апроксимацію. Графічна інтерпретація цих залежностей представлена на рис. 5. З графіків видно, що процес формоутворення фесто́нів протікає лише на початковій стадії видавлювання, після чого висота фесто́на  $\Delta H$  не змінюється. Аналіз графіків (див. рис. 5) та розмірів видавлених коробок із різними товщинами стінки, які лежать в області їхнього варіювання, показує, що процеси фесто́ноутворення в усіх випадках закінчувались при глибині порожнини, яка приблизно дорівнює ширині пуансона  $b$ . Тому реалізацію плану експерименту здійснювали для умови  $H \geq 2b$ . Експерименти показали, що висота вихідної заготованки (за усіх інших рівних умов) не впливає на  $\Delta H$ .

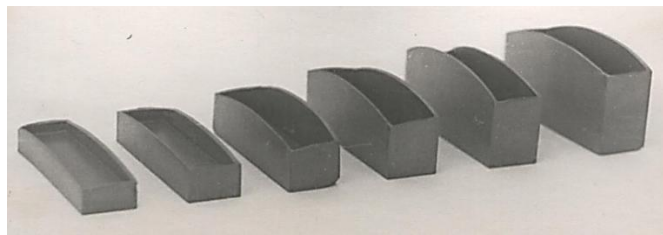


Рис. 3. Коробки, що отримані із різною глибиною занурення пуансона у заготованку

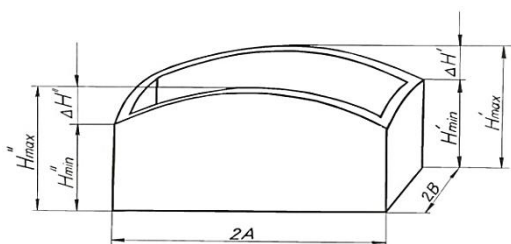


Рис. 4. Схема до визначення висоти фесто́ну  $\Delta H$

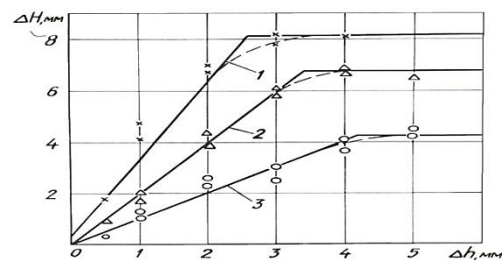


Рис. 5. Залежність  $\Delta H$  від  $\Delta h$  при різних значеннях  $\bar{S}$  (1 – 0,05; 2 – 0,2; 3 – 0,35)

Попередніми експериментами встановлено також, що при фіксованих значеннях ширини коробки ( $2B = 20, 40, 60$  мм) найсуттєвіший вплив на  $\Delta H$  має відносна довжина коробки  $\bar{\alpha}$  (рис. 6). Графічна залежність  $\Delta H = f(\bar{\alpha})$  при різних  $\bar{S}$  представлена на рис. 7.

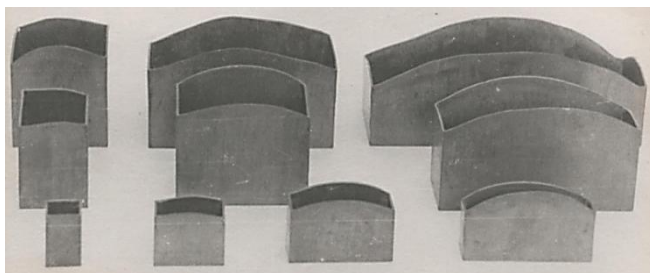


Рис. 6. Коробки із різними значеннями факторів  $B$  и  $\bar{\alpha}$

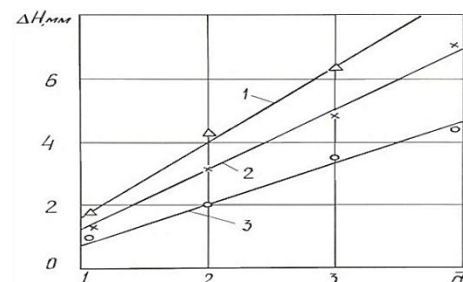


Рис. 7. Залежність  $\Delta H$  від  $\bar{\alpha}$  при різних значеннях  $\bar{S}$  (1 – 0,05; 2 – 0,2; 3 – 0,35)

Із збільшенням коефіцієнта тертя  $\mu$  висота фесто́на  $\Delta H$  збільшується. Коефіцієнти тертя при різних умовах на контактній поверхні заготованки з інструментом, а також інтервали варіювання факторів та їхні рівні визначали на підставі спеціальних дослідів.

В кожній точці факторного простору дослід повторювали три рази. Досліди, які були передбачені планом матриці, виконували у випадковій послідовності. Порядок реалізації дослідів ( $m_1, m_2, m_3$  – див. табл. 2) визначали за допомогою генератора випадкових чисел. Результати досліджень надані у табл. 5.

Таблиця 4

Значення  $\Delta H$  в залежності від  $\bar{S}$  і глибини занурення пуансона  $\Delta h$ 

$\bar{S}$	$\Delta h$ , мм	$\Delta H$ , мм	Апроксимуюча залежність
0,05	0,5	1,75; 1,62	$\Delta H = 3,69 \cdot \Delta h + 0,69$
	1	4,20; 4,75	
	2	6,70; 7,00	
	3	7,75; 8,15	
	4	8,30; 7,90	
0,2	1	1,92; 1,62	$\Delta H = 2,03 \cdot \Delta h - 0,07$
	2	4,35; 3,85	
	3	5,80; 6,15	
	4	6,65; 6,70	
	5	6,50; 6,73	
0,35	1	1,05; 1,30	$\Delta H = 0,97 \cdot \Delta h + 0,06$
	2	2,30; 2,57	
	3	3,00; 2,78	
	4	3,83; 4,05	
	5	4,20; 4,05	
	6	4,15; 4,25	

Таблиця 5

Результати експериментів та дисперсій відхилень  $\Delta H$  від середнього значення і результати розрахунку для перевірки адекватності моделі

Номер точки плану	$Y_1 = \frac{\Delta H_1}{B}$	$Y_2 = \frac{\Delta H_1}{B}$	$Y_3 = \frac{\Delta H_1}{B}$	$\bar{Y}_V = \frac{\Delta H_1}{B}$	$S^2_v \cdot 10^{-3}$	$\hat{Y}_{V,\Lambda} \cdot 10^{-3}$	$(\hat{Y}_V - \hat{Y}_{V,\Lambda})^2 \cdot 10^{-3}$
1	0,0775	0,0950	0,0855	0,0860	0,0768	77,63	0,0701
2	0,4150	0,5030	0,4320	0,4500	2,1800	458,38	0,0703
3	0,0365	0,0440	0,0417	0,0407	0,0147	49,13	0,0710
4	0,2050	0,3450	0,2100	0,2200	0,4680	211,57	0,0712
5	0,0990	0,1275	0,1137	0,1134	0,2030	121,83	0,0710
6	0,5690	0,6430	0,5680	0,5930	1,8180	584,59	0,0708
7	0,0477	0,0603	0,0568	0,0549	0,0417	46,53	0,0701
8	0,0265	0,3045	0,2785	0,2783	0,4040	290,97	0,0700

До математичної моделі включили лише значущі коефіцієнти. Отримали рівняння регресії у такому вигляді:

$$Y = 0,23 + 0,156 \cdot x_1 + 0,081 \cdot x_2 + 0,031 \cdot x_3 + 0,055 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,021 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,012 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2)$$

У дійсних значеннях чинників:

$$\frac{\Delta H}{B} = 0,23 + 0,156 \cdot \bar{\alpha} - 0,0811 \cdot \bar{S} + 0,031 \cdot \mu - 0,055 \cdot \bar{\alpha} \cdot \bar{S} + 0,021 \cdot \mu \cdot \bar{\alpha} - 0,012 \cdot \mu \cdot \bar{S} \quad (3)$$

або

$$\Delta H = 0,23 \cdot B + 0,156 \cdot \bar{\alpha} \cdot B - 0,0811 \cdot \bar{S} \cdot B + 0,031 \cdot \mu \cdot B - 0,055 \cdot \bar{\alpha} \cdot \bar{S} \cdot B + 0,021 \cdot \mu \cdot \bar{\alpha} \cdot B - 0,012 \cdot \mu \cdot \bar{S} \cdot B. \quad (4)$$

Таким чином, рівняння (4) дозволяє визначити висоту фєстона будь-якої коробки, геометричні параметри якої лежать в межах значень рівнів чинників, передбачених експериментом (див. табл. 3). У виробничих умовах визначення висоти фєстона необхідно для розрахунку припусків на підрізування торчача коробки, а також розмірів вихідної заготовки. Знати попередньо висоту фєстона необхідно також при конструюванні пуансонів.

Треба підкреслити, що при видавлюванні низьких коробок ( $H \leq B$ ) у зв'язку з утворенням фестонів при підрізанні торчача втрачається до 30% метала. Крім того, нерівномірність деформації та додаткові напруження можуть призвести до втрати сталості та утворення гофрів на стінках коробок.

Оскільки ми дослідили особливості формозміни і з'ясували причини утворення фестонів, нам вдалося оптимізувати конструкцію пуансона з метою зменшення висоти фестонів та покращення якості коробок.

Управління плином металу здійснювали регулюванням інтенсивності дії сил контактної тертя між інструментом і заготовкою шляхом раціонального вибору контактної поверхні калібрувальних поясків. Із збільшенням цієї поверхні підвищується сила тертя на відповідній ділянці пластичної зони, що зменшує швидкість компоненти  $v_z$  на цій ділянці.

У дослідженні видавлювали коробки з розмірами  $A = 60$  мм,  $2B = 20$  мм,  $S = 0,5$  мм и  $A = 80$  мм,  $2B = 40$  мм,  $S = 0,5$  мм пуансонами, в яких калібрувальні пояски спрофільовані з урахуванням нерівномірного плину металу по периметру заготовки. На вузьких гранях поясок був прямолінійним висотою  $l_B = 1$  мм, на широких – мав форму параболи або трапеції із округленими кутами з висотою 30 и 40 мм відповідно (рис. 8). Таким чином, на першому пуансоні співвідношення  $l_{a\max}/l_B$  було 30, а на другому – 40. При таких співвідношеннях швидкість течії по вузьких гранях була більшою, ніж по широких.

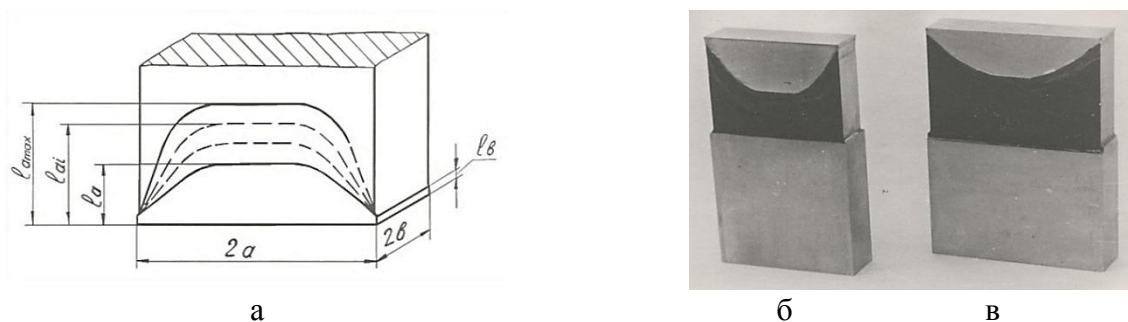


Рис. 8. Пуанسونи з профільованими калібрувальними поясками:  
а – схема; б, в – світлини

Тому коробки виходили навіть з від'ємною висотою фестонів, тобто на широких гранях утворювались западини (як це показано на рис. 9), а в кутах розриви.

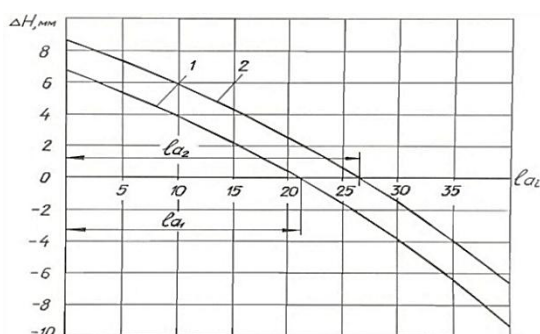


Рис. 9. Залежність  $\Delta H$  від  $l_{ai}$  при різних значеннях  $\bar{\alpha}$ ,  $2B = 20$  мм и  $\bar{S} = 0,05$ :  
1 –  $\bar{\alpha} = 3$ ; 2 –  $\bar{\alpha} = 4$

Далі висоту калібрувальних поясків по широких гранях послідовно зменшували, до тих пір, доки не досягали вирівнювання швидкостей течії по вузьких гранях такої самої, як і по усьому периметру коробки, щоб отримати нульову висоту фестонів. За даними експериментів побудована залежність  $\Delta H = f(l_{ai})$  (див. рис. 9), яка дозволяє визначити оптимальну висоту пояска, який забезпечує раціональну формозміну коробки.

## ВИСНОВКИ

1. Для экспериментального дослідження формозміни при видавлюванні коробок розроблений і виготовлений спеціальний штамп.
2. Встановлено, що найсуттєвішими чинниками, які впливають на характер і висоту фестонів, є такі: відносна довжина коробки, її ширина, товщина стінки, а також коефіцієнт тертя.
3. Встановлено, що процес формоутворення фестонів протікає лише на початковій стадії видавлювання, після чого висота фестона  $\Delta H$  не змінюється.
4. Отримане співвідношення, яке дозволяє визначити висоту фестона для будь-якої коробки, геометричні параметри якої лежать в межах значень рівнів чинників, що використані для цього експериментального дослідження.
5. Практично показана можливість оптимізації конструкції пуансонів з метою зменшення висоти фестонів та підвищення якості коробок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Евстратов В. А. Новые подходы к математическому моделированию процессов выдавливания в условиях вихревого течения / В. А. Евстратов, В. Н. Левченко, Г. А. Кротенко // Вестник национального технического университета «ХПИ», Вып. 21, 2009. – С. 100–109.
2. Евстратов В. А. Математическое моделирование процессов выдавливания в условиях трехмерного течения / В. А. Евстратов, Г. А. Кротенко, В. Н. Левченко // Обработка материалов давлением: сборник научных работ. – Краматорск : ДДМА. – 2010. – № 2 (23). – С. 8–15.
3. Евстратов В. О. Теоретический анализ процесса выдавливания в условиях несимметричного розташування інструмента / В. О. Евстратов, В. М. Левченко, В. С. Калина // Вісник НТУ «ХПИ». Серія : Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 42. – С. 48–54.
4. Воронцов А. Л. Состояние теоретических исследований плоского выдавливания при несимметричном расположении инструмента / А. Л. Воронцов, С. М. Карпов, В. П. Ступников // Кузнечно-штамповочное производство, № 4, 2013. – С. 3–10.
5. Воронцов А. Л. Силовые параметры и формоизменение заготовки при плоском выдавливании с несоосным расположением пуансона и матрицы. Часть 1 / А. Л. Воронцов, С. М. Карпов, В. П. Ступников // Кузнечно-штамповочное производство, № 5, 2013. – С. 3–10.
6. Воронцов А. Л. Силовые параметры и формоизменение заготовки при плоском выдавливании с несоосным расположением пуансона и матрицы. Часть 2 / А. Л. Воронцов, С. М. Карпов, В. П. Ступников // Кузнечно-штамповочное производство, № 6, 2013. – С. 3–10.

## REFERENCES

1. Evstratov V. A. Novye podhody k matematicheskomu modelirovaniyu processov vydavlivaniya v usloviyah vihrevogo techeniya / V. A. Evstratov, V. N. Levchenko, G. A. Krotenko // Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta «HPI», Вып. 21, 2009. – С. 100–109.
2. Evstratov V. A. Matematicheskoe modelirovanie processov vydavlivaniya v usloviyah trehmernogo techeniya / V. A. Evstratov, G. A. Krotenko, V. N. Levchenko // Obrabotka materialov davleniem: zbirnik nauko-vih prac'. – Kramatorsk : DDMA. – 2010. – № 2 (23). – С. 8–15.
3. Evstratov V. O. Teoretichnij analiz procesu vidavljivannja v umovah nesimetrichnogo roztashuvannja instrumenta / V. O. Evstratov, V. M. Levchenko, V. S. Kalita // Visnik NTU «HPI». Serija : Novi rishennja u suchasnih tehnologijah. – Harkiv : NTU «HPI». – 2013. – № 42. – С. 48–54.
4. Voroncov A. L. Sostojanie teoreticheskikh issledovaniy ploskogo vydavlivaniya pri nesimetrichnom raspolozhenii instrumenta / A. L. Voroncov, S. M. Karpov, V. P. Stupnikov // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo, № 4, 2013. – С. 3–10.
5. Voroncov A. L. Silovye parametry i formoizmenenie zagotovki pri ploskom vydavlivanii s nesoosnym raspolozheniem puansona i matricy. Chast' 1 / A. L. Voroncov, S. M. Karpov, V. P. Stupnikov // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo, № 5, 2013. – С. 3–10.
6. Voroncov A. L. Silovye parametry i formoizmenenie zagotovki pri ploskom vydavlivanii s nesoosnym raspolozheniem puansona i matricy. Chast' 2 / A. L. Voroncov, S. M. Karpov, V. P. Stupnikov // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo, № 6, 2013. – С. 3–10.

Евстратов В. А. – д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»  
Левченко В. Н. – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»  
Калина В. С. – студент НТУ «ХПИ»

НТУ «ХПИ» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

E-mail: [omd.kpi.kharkov@mail.ru](mailto:omd.kpi.kharkov@mail.ru)

Стаття надійшла до редакції 18.04.2014 р.