

УДК 621.73

Николенко Р. С.
Фролов Е. А.
Кухарь В. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОСАДКЕ ВЫПУКЛЫМИ БОЙКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В современной кузнечно-штамповочной отрасли широко используют внедрение предварительных профилирующих операций для достижения приближения формы заготовки к конфигурации поковки при штамповке и проработки литого металла и заварки дефектов в осевой зоне слитка при ковке [1]. Подготовка формы заготовки позволяет перераспределить силовые режимы по переходам, улучшить заполнение ручьев, снизить давления на контакте инструмента и заготовки, обеспечив равномерное напряженно-деформированное состояние инструмента. Введение предварительного профилирования позволяет в 1,4–2,0 раза повысить стойкость окончательных ручьев штампов [2].

Осадка выпуклыми продолговатыми бойками достаточно изучена как с точки зрения формоизменения [3], так и с точки зрения изменений напряженно-деформированного состояния [4]. Технологии, включающие осадку выпуклыми плитами, успешно использованы в промышленности [5], однако номенклатура изделий, на которые данный способ может быть ориентирован, не является распространенной. Для расширения технологических возможностей заготовительных операций, выполняемых на кривошипно-горячештамповочных прессах (КГШП), предложено рассмотреть процесс осадки выпуклыми продолговатыми бойками с эксцентриситетом их внедрения в торец цилиндрической заготовки и без него. В работах [6–8] начато исследование процесса осадки заготовок выпуклыми бойками с эксцентриситетом нагрузки. В частности, изучено развитие напряженно-деформированного состояния [7] и формоизменения [7, 8] при осадке заготовок с отношением высоты (H_0) к диаметру (D_0) $H_0/D_0 = 1$ и 2,0 плитами с радиусом выпуклости бойка $R = 30; 50; 75; 112,5$ мм, т. е. с отношением $R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5$ и 2,25.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование формоизменения цилиндрических заготовок при осадке выпуклыми радиусными бойками с эксцентриситетом нагрузки с применением пакета конечно-элементного моделирования и получением регрессионных зависимостей по методике планирования эксперимента.

Для достижения указанной цели исследований выполняли моделирование процесса осадки заготовок в пакете конечно-элементного анализа Deform 3D (лицензия № 8145). Материал заготовки – сталь 38ХС, при этом модель упрочнения, также как и граничные условия, взяты в соответствии с условиями, предложенными программой. Температурные условия принимали изотермическими, температура деформации 1100 °С. Заданное количество конечных элементов составляло 10 000 шт., однако, после генерации сетки, количество элементов было принято 7 847 шт. Коэффициент контактного трения при деформации, принимали $f = 0,3$.

В связи с тем, что результаты моделирования в широком диапазоне отношений радиуса осадочных плит R к диаметру заготовки D_0 предполагается проверить экспериментально путём осадки на испытательной машине, скорость деформирования принята $v = 1$ мм/с. Моделировали процесс осадки до относительных степеней обжатия $\varepsilon_h = (H_0 - H)/H_0 = 0,5$, где $\Delta h = (H_0 - H)$ – величина хода инструмента (абсолютное обжатие), мм. Твердотельные модели осажённых заготовок представлены на рис. 1.

Выделяли основные показатели формоизменения и устанавливали их зависимость от степени осадки (ε_h), отношения радиуса выпуклых плит к диаметру заготовки (R/D), отношения исходных размеров заготовки (H_0/D_0) и величины эксцентриситета нагрузки (e).

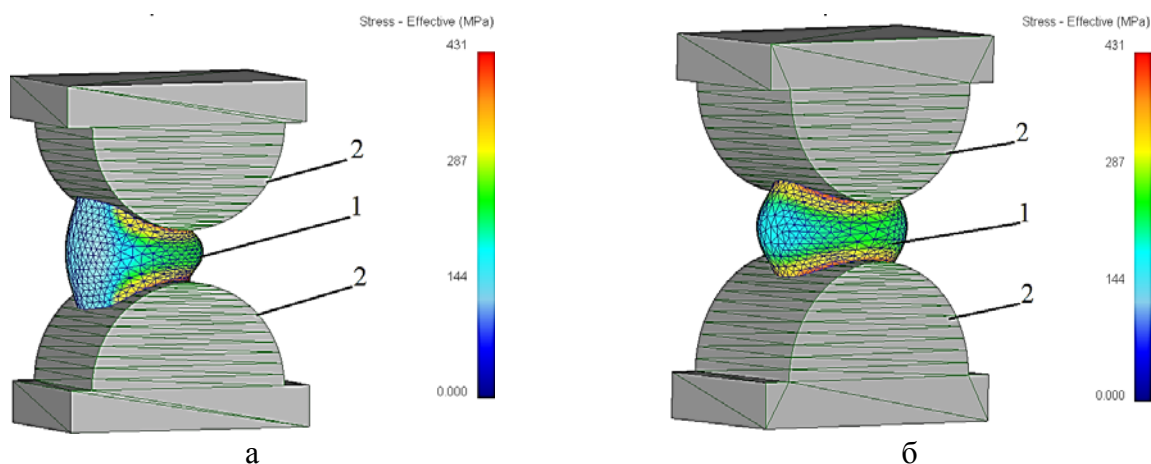


Рис. 1. Твердотельная модель заготовки (1) после осадки выпуклыми бойками (2): а – без эксцентриситета $e = 0$; б – с эксцентриситетом $e = 0,25$

Изучение формоизменения целесообразно провести при максимальной величине эксцентриситета $e = 0,25 D_0$ и $e = 0$. Отношения конечных геометрических размеров заготовки являются безразмерными макропоказателями, характеризующими развитие неравномерности деформации в продольном, поперечном и высотном направлениях. За основные макропоказатели приняты (рис. 2, а и б): $Y_1 = H_1/H_0$; $Y_2 = H/H_0$; $Y_3 = H_1/H$; $Y_4 = D_3/D_0$, $Y_5 = D_3'/D_0$; $Y_6 = D_4/D_0$, $Y_7 = D_4'/D_0$ где H_1 – высота краевого участка полуфабриката после осадки, H – наименьшая высота профилированного полуфабриката после осадки, D_3 и D_3' – продольный и поперечный размеры полуфабриката после осадки по середине его высоты, D_4 и D_4' – продольный и поперечный размеры полуфабриката в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой после осадки (рис. 2). Исследование формоизменения проводили в диапазоне степеней обжатий ε_h от 0,2 до 0,5.

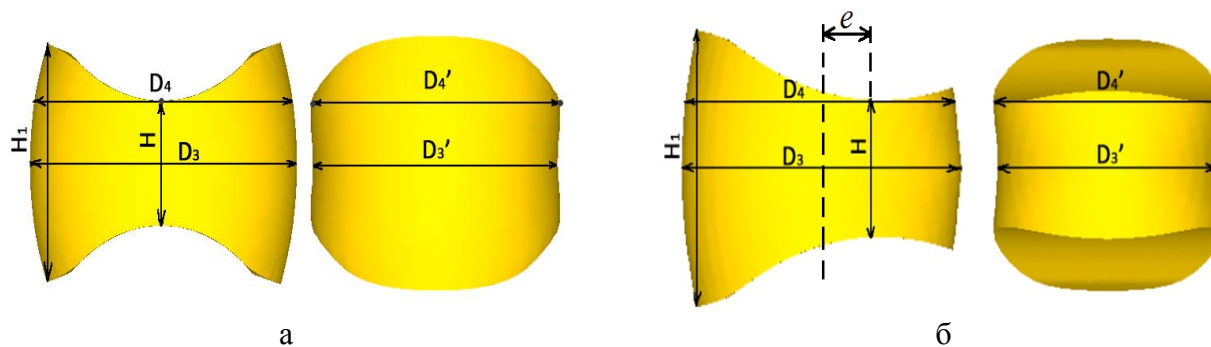


Рис. 2. Схема обмера заготовки после осадки выпуклыми бойками: а – без эксцентриситета $e = 0$; б – с эксцентриситетом $e = 0,25$

По данным моделирования были рассчитаны макропоказатели формоизменения, которые использованы в дальнейшем расчёте и составлении уравнений регрессии. В качестве основных факторов, влияющих на формоизменение, были выделены: ε_h (фактор X_1) – относительная степень деформации; $R/D_0 \cdot (X_2)$ – отношение радиуса деформирующего инструмента к исходному диаметру заготовки; $H_0/D_0 \cdot (X_3)$ – отношение исходных размеров заготовки; $e/D_0 \cdot (X_4)$ – отношение величины эксцентриситета нагрузки к исходному диаметру заготовки.

Значения факторов варьировали на двух уровнях. Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов для установления зависимости интенсивности закрытия осевого отверстия от технологических факторов

Факторы	ε_h	R/D_0	H_0/D_0	e/D_0
Обозначение фактора, X_i	X_1	X_2	X_3	X_4
Нижний уровень, X_{in}	0,2	0,6	1	0
Верхний уровень, X_{ie}	0,5	2,25	2	0,25
Нулевой уровень, X_{i0}	0,35	1,425	1,5	0,125
Интервал варьирования, ΔX_i	0,15	0,825	0,5	0,125

В работе рассматривали линейную регрессионную модель с учетом парных взаимодействий. В качестве плана вычислительного эксперимента использовали двухуровневый полнофакторный эксперимент (ПФЭ) 2^4 . Для реализации такого эксперимента использовали программу Experimental Design (рис. 3).

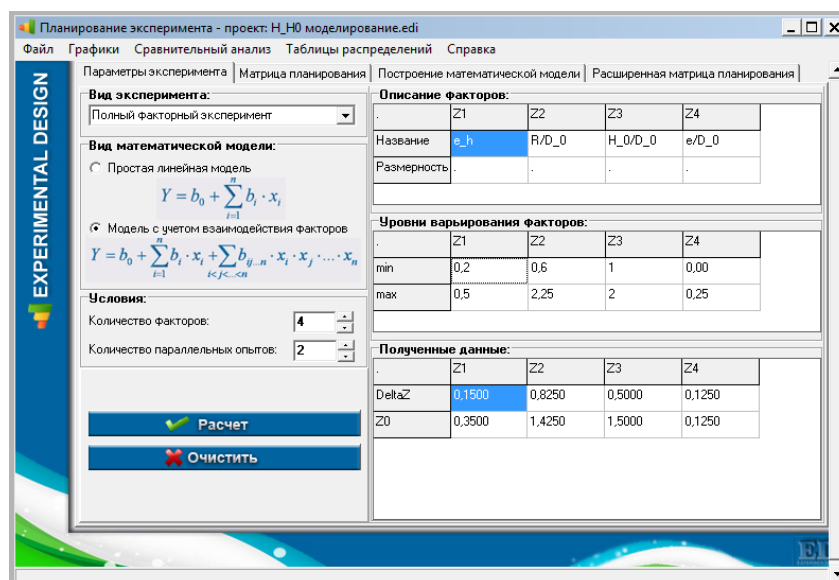


Рис. 3. Интерфейс программы Experimental Design

Математическую модель процесса, имеющую вид:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4); \quad (1)$$

запишем в виде линейного уравнения регрессии с учетом всех взаимодействий:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_1 X_2 + b_6 \cdot X_1 X_3 + b_7 \cdot X_1 X_4 + b_8 \cdot X_2 X_3 + b_9 \cdot X_2 X_4 + b_{10} \cdot X_3 X_4 + b_{11} \cdot X_1 X_2 X_3 + b_{12} \cdot X_1 X_2 X_4 + b_{13} \cdot X_1 X_3 X_4 + b_{14} \cdot X_2 X_3 X_4 + b_{15} \cdot X_1 X_2 X_3 X_4, \quad (2)$$

где b_i – коэффициенты уравнения в кодированном масштабе, определяемые как:

$$b_j = \sum_{i=1}^N Y_i X_{ji} / N, \quad j = 0, 1 \dots k, \quad (3)$$

где $N = 2^k$ – число опытов в эксперименте (здесь k – число факторов).

Кодированные значения факторов на верхнем Z_{ie} и нижнем Z_{in} уровнях:

$$Z_{ie} = (X_{ie} - X_{i0}) / \Delta X_i; \quad Z_{in} = (X_{in} - X_{i0}) / \Delta X_i. \quad (4)$$

Выполняли реализацию моделирования согласно плану полного факторного эксперимента по методике планирования 2^4 с полным взаимодействием факторов. Методика планирования эксперимента предполагает наличие параллельных опытов с проверкой гипотезы однородности дисперсий S^2 [9, 10]. Однако проведение вычислений в процессе математического моделирования обуславливает отсутствие вероятностного разброса результатов. Для обеспечения возможности обработки результатов вычислений по известным методикам [9, 10] вводили малую дисперсию $S^2 = 0,0001$ исходя из гипотетического предположения проведения двух параллельных опытов. Задавались уровнем надежности $\alpha = 0,95$. Тогда табличное значение критерия Кохрена для моделирования формоизменения стальных заготовок $G_{табл} = 0,4546$ [9, 10]. Дисперсии считают однородными, когда расчетное значение $G_p < G_{табл}$, что требует проверки. При постоянном значении внесенной дисперсии $S^2 = S_{max}^2 = 0,0001$ расчетные значения $G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$. Следовательно, внесенные дисперсии однородны. Критические значения критериев Фишера для оценки адекватности регрессионной модели [9, 10]: $F_{kp} = 3,24$. В случае, когда расчетный критерий Фишера F меньше критического, т. е. $F < F_{kp}$, модель является адекватной. Оценку каждого коэффициента уравнений регрессии проводили по критерию Стьюдента, которые определены как [9, 10]: $t_{\alpha, f} = 2,12$. Проводили моделирование значений макропоказателей формоизменения: $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7$.

Переход от кодированных значений к натуральным выполняли как:

$$\begin{aligned} X_1 &= (\varepsilon_h - 0,35)/0,15; X_2 = (R/D_0 - 1,425)/0,825; X_3 = (H_0/D_0 - 1,5)/0,5; \\ X_4 &= (e/D_0 - 0,125)/0,125. \end{aligned} \quad (5)$$

В табл. 2–8 приведены результаты расчётов формоизменения заготовок с использованием методики планирования полного факторного эксперимента для $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7$.

Таблица 2

Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя Y_1

Макропоказатели	Коэффициенты регрессии							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
$Y_1 = H_1 / H_0$	0,81336	-0,11113	-0,05683	0,00347	-0,03436	-0,02374	-0,00917	-0,02264
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	0,00073	0,02848	0,05681	0,00777	0,02272	0,01077	-0,00621	0,00198
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена			
	$F = 1,75917 < F_{kp} = 3,24$				$G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Таблица 3

Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя Y_2

Макропоказатели	Коэффициенты регрессии							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
$Y_2 = H / H_0$	0,65774	-0,15194	0,00029	-0,00480	0,00129	-0,00066	-0,00248	0,00034
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,00133	-0,00129	0,00107	-0,00037	-0,00026	0,00003	-0,00087	0,00015
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена			
	$F = 0,34427 < F_{kp} = 3,24$				$G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Таблица 4

Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя Y_3

Макропоказатели	Коэффициенты регрессии							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
$Y_3 = H_1 / H$	1,26484	0,12286	-0,09956	0,01275	-0,06651	-0,05729	-0,00620	-0,05089
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	0,00632	0,05794	0,09172	0,01393	0,04936	0,03632	-0,00600	0,00280
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена			
	$F = 2,50879 < F_{кр} = 3,24$				$G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Таблица 5

Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя Y_4

Макропоказатели	Коэффициенты регрессии							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
$Y_4 = D_3 / D_0$	1,23689	0,14032	0,04026	0,00041	-0,00396	0,01792	0,01695	0,00517
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,00036	0,00346	-0,00469	-0,00065	0,00472	-0,00645	-0,00551	-0,00200
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена			
	$F = 1,06963 < F_{кр} = 3,24$				$G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Таблица 6

Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя Y_5

Макропоказатели	Коэффициенты регрессии							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
$Y_5 = D_3' / D_0$	1,06938	0,03444	0,00118	-0,0412	-0,02579	-0,00579	-0,00993	-0,01430
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,02544	-0,01941	0,01930	-0,01340	-0,00855	0,01249	0,01853	0,00849
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена			
	$F = 0,44179 < F_{кр} = 3,24$				$G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Таблица 7

Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя Y_6

Макропоказатели	Коэффициенты регрессии							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
$Y_6 = D_4 / D_0$	1,16544	0,11406	-0,00074	0,02334	-0,00856	0,00599	0,00686	-0,01299
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,01714	0,00001	0,01504	-0,01041	0,00059	0,01491	0,00181	0,00259
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена			
	$F = 0,69565 < F_{кр} = 3,24$				$G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Таблица 8

Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя Y_7

Макропоказатели	Коэффициенты регрессии							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
$Y_7 = D_4' / D_0$	1,09096	0,02023	0,00463	0,00221	0,12267	-0,00199	0,01226	0,05649
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,00292	0,00407	-0,01191	0,00048	-0,01676	0,00774	-0,00421	-0,00746
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена			
	$F = 1,40745 < F_{кр} = 3,24$				$G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Результаты позволяют прогнозировать формоизменение цилиндрических заготовок в процессах профилирования осадкой выпуклыми продолговатыми бойками. Оценка значимости факторов показывает существенное влияние на формоизменение относительной степени деформации ε_h , отношения радиуса деформирующего инструмента к исходному диаметру заготовки R/D_0 , отношения исходных размеров заготовки H_0/D_0 , отношения величины эксцентриситета нагрузки к исходному диаметру заготовки e/D_0 в исследуемых пределах. При этом на характеристику высотной деформации H_1/H_0 значимо влияет только факторы H_0/D_0 и e/D_0 , а на характеристику продольной деформации D_4/D_4' степень деформации осадки ε_h существенного влияния не оказывает.

ВЫВОДЫ

Проведено моделирование формоизменения заготовок из стали 38ХС в программном комплексе для конечно-элементного моделирования Deform при осадке выпуклыми продолговатыми бойками с наличием эксцентриситета внедрения бойков в торцы заготовок. В виде уравнений регрессии установлено зависимости изменения основных показателей неравномерности деформации по высоте, а также в продольном и поперечном направлении, от факторов относительной степени деформации осадки ε_h , отношения радиуса деформирующего инструмента к исходному диаметру заготовки R/D_0 , отношения исходных размеров заготовки H_0/D_0 , отношения величины эксцентриситета нагрузки к исходному диаметру заготовки e/D_0 для образцов с $H_0/D_0 = 1,0$ и $2,0$. Адекватность полученных регрессионных моделей подтверждается значениями критерия Фишера (максимальное значение $F = 2,50879 < F_{кр} = 3,24$), а воспроизводимость – величинами критерия Кохрена ($G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технологія кування* / Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є. Марков, Л. І. Алієва. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 268 с.
2. Довнар С. А. *Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объёмной штамповки* / С. А. Довнар. – М. : Машиностроение, 1975. – 254 с.
3. Кухарь В. В. *Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитами* / В. В. Кухарь, С. А. Короткий, В. А. Бурко // *Вісник Хмельницького національного університету ХНУ. – Хмельницький, 2008. – № 5. – С. 204–208.*
4. Кухарь В. В. *Влияние радиусности выпуклых продолговатых осадочных плит на деформированное состояние и степень использования запаса пластичности при кузнечной осадке* / В. В. Кухарь // *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 105–111.*
5. *Совершенствование технологии штамповки на КГШП поковок для деталей поглощающих аппаратов* / В. В. Кухарь, В. А. Бурко, С. А. Короткий, Е. Ю. Балалаева // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010 – № 3 (24). – С. 69–75.*

6. Кухарь В. В. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Проблемы трибологии (*Problems of Tribology*). – 2012. – № 3. – С. 132–136.

7. Кухарь В. В. Исследование формоизменения заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Б. С. Каргин, Р. С. Николенко // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 46 (952). – С. 71–76.

8. Кухарь В. В. Моделирование формоизменения относительно высоких заготовок при осадке выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 2 (37). – С. 57–61.

9. Омельченко П. П. Планирование и обработка результатов экспериментов / П. П. Омельченко. – К. : УМК ВО, 1991. – 84 с.

10. Лунев В. А. Математическое моделирование и планирование эксперимента : учеб. пособие / В. А. Лунев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 164 с.

REFERENCES

1. *Tehnologija kuvannja* / L. M. Sokolov, I. S. Aliev, O. C. Markov, L. I. Alieva. – Kramators'k : DDMA, 2011. – 268 s.

2. *Dovnar S. A. Termomehanika uprochnjenja i razrushenija shtampov ob'jomnoj shtampovki* / S. A. Dovnar. – M. : Mashinostroenie, 1975. – 254 s.

3. *Kuhar' V. V. Modelirovanie formoizmenenija metalla pri osadke cilindricheskikh zagotovok vypuklymi prodolgovatyimi plitami* / V. V. Kuhar', S. A. Korotkij, V. A. Burko // *Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu HNU*. – Hmel'nic'kij, 2008. – № 5. – С. 204–208.

4. *Kuhar' V. V. Vlijanie radiusnosti vypuklykh prodolgovatykh osadochnyh plit na deformirovanoe sostojanie i stepen' ispol'zovanija zapasa plastichnosti pri kuznechnoj osadke* / V. V. Kuhar' // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 1 (30). – С. 105–111.

5. *Sovershenstvovanie tehnologii shtampovki na KGShP pokovok dlja detalej pogloshhajushhih apparatov* / V. V. Kuhar', V. A. Burko, S. A. Korotkij, E. Ju. Balalaeva // *Obrabotka materialov davlenim : sb. nauch. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2010 – № 3 (24). – С. 69–75.

6. *Kuhar' V. V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija zagotovok pri profilirovanii vypuklymi plitami s jekscentrisitetom nagruzki* / V. V. Kuhar', R. S. Nikolenko // *Problemi tribologii (Problems of Tribology)*. – 2012. – № 3. – С. 132–136.

7. *Kuhar' V. V. Issledovanie formoizmenenija zagotovok pri profilirovanii vypuklymi plitami s jekscentrisitetom nagruzki* / V. V. Kuhar', B. S. Kargin, R. S. Nikolenko // *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»*. – Harkiv : NTU «HPI», 2012. – № 46 (952). – С. 71–76.

8. *Kuhar' V. V. Modelirovanie formoizmenenija otmositel'no vysokih zagotovok pri osadke vypuklymi plitami s jekscentrisitetom nagruzki* / V. V. Kuhar', R. S. Nikolenko // *Zbirnik naukovih prac' (galuzeve mashinobuduвання, budivnictvo)*. – Poltava : PoltNTU, 2013. – Вип. 2 (37). – С. 57–61.

9. *Omel'chenko P. P. Planirovanie i obrabotka rezul'tatov jeksperimentov* / P. P. Omel'chenko. – K. : УМК ВО, 1991. – 84 с.

10. *Lunev V. A. Matematicheskoe modelirovanie i planirovanie jeksperimenta : ucheb. posobie* / V. A. Lunev. – SPb. : Izd-vo Politehn. un-ta, 2006. – 164 с.

Николенко Р. С. – аспирант ГВУЗ «ПГТУ»

Фролов Е. А. – д-р техн. наук, проф. ПНТУ им. Ю. Кондратюка

Кухарь В. В. – д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

ГВУЗ «ПГТУ» – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь;

ПНТУ им. Ю. Кондратюка – Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, г. Полтава.

E-mail: niklenk.rma@rambler.ru