

## ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЗАГОТОВОК ПРИ ЭКСЦЕНТРИЧНОЙ ОСАДКЕ ВЫПУКЛЫМИ ВСТАВКАМИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ПРОФИЛЯ

*Разработана методика исследования формоизменения цилиндрических заготовок при эксцентричной осадке выпуклыми вставками с различной высотой профиля в пакете компьютерного конечно-элементного моделирования с применением методики планирования эксперимента. В результате исследований получены закономерности, которые позволяют прогнозировать макропоказатели формоизменения цилиндрической заготовки при эксцентричной осадке выпуклыми вставками, учитывающие исходные размеры заготовки, конструкцию инструмента и величину эксцентриситета.*

**Ключевые слова:** цилиндрическая заготовка, эксцентричная осадка, выпуклые бойки, формоизменение, планирование эксперимента.

**Введение.** Внедрение предварительных профилирующих операций для достижения приближения формы заготовки к конфигурации поковки при штамповке [1] получило большое распространение в современной кузнечно-штамповочной отрасли и имеет большие перспективы для дальнейших разработок.

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].

**Анализ последних исследований и публикаций.** 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 ( $D_0$ )  $H_0 / D_0 = 1,0$  и 2,0 плитами с радиусом выпуклости бойка = 30; 50; 75; 112,5 мм, т.е. с отношением 0,6; 1,0; 1,5 и 2,25.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Процесс осадки относительно высоких цилиндрических заготовок с эксцентриситетом нагрузки, при высоком профиле вставок и больших степенях деформации сопровождается проскальзыванием заготовки по поверхности деформирующего инструмента, что вызвано смещением центра приложения силы и, в ряде случаев. Для решения данной проблемы предложена методика осадки с переменной высотой профиля выпуклых вставок.

**Постановка цели и задач исследования.** Целью настоящей работы является теоретическое исследование формоизменения цилиндрических заготовок при осадке выпуклы-

ми радиусными вставками с различной высотой профиля и различной величиной эксцентриситета нагрузки и 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 пакетом. Температурные условия принимали изотермическими, температура деформации 1100 °С. Заданное количество конечных элементов составляло 10000 шт., однако, после генерации сетки, количество элементов было принято 7847 шт. Коэффициент контактного трения при деформации принимали  $f = 0,3$ .

**Основной материал и результаты.** Для обеспечения стабильности формоизменения было предложено ограничивать высоту выпуклости профиля плиты от максимального  $h_{p,max} = R$  до минимального значения  $h_{p,min} = R/4$  (рис. 1). При такой конструкции инструмента продольно изогнутая заготовка со стороны максимальной высоты упирается в плоскость осадочной плиты, на которой крепится профиль выпуклой вставки, что исключает выскользывание заготовки из зоны деформации и позволяет приблизить полуфабрикат к необходимой форме (см. рис. 1).

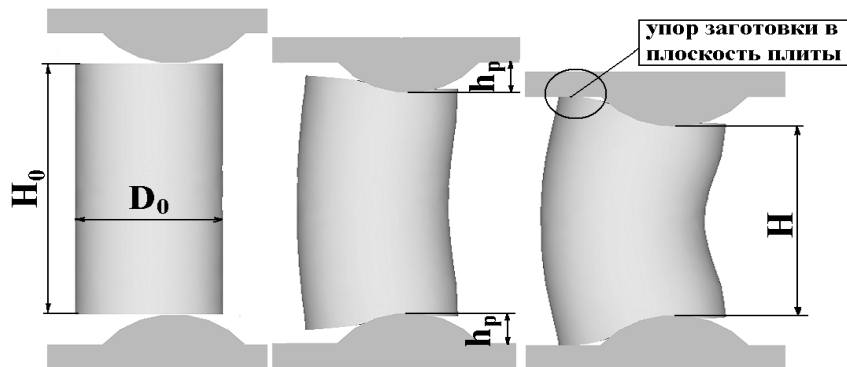


Рис. 1. Процесс осадки с искусственным упором

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. 2.

Выделяли основные показатели формоизменения и устанавливали их зависимость от степени осадки ( $\varepsilon_h$ ), отношения радиуса выпуклых плит к диаметру заготовки ( $R/D_0$ ), отношения исходных размеров заготовки ( $\rho$ ) и величины эксцентриситета нагрузки ( $e$ ). Изучение формоизменения целесообразно провести при максимальной величине эксцентриситета  $e = 0,25 \cdot D_0$  и  $e = 0$ . Отношения конечных геометрических размеров заготовки являются безразмерными макропоказателями (рис. 3, а и б), характеризующими развитие неравномерности деформации в продольном, поперечном и высотном направлениях. За основные макропоказатели приняты:  $Y_1 = H_1 / H_0$ ,  $Y_2 = H / H_0$ ,  $Y_3 = H_1 / H$ ,  $Y_4 = D_3 / D_0$ ,  $Y_5 = D'_3 / D_0$ , 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 после осадки по краям его высоты.

поперечный размеры полуфабриката в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой после осадки (см. рис. 3).

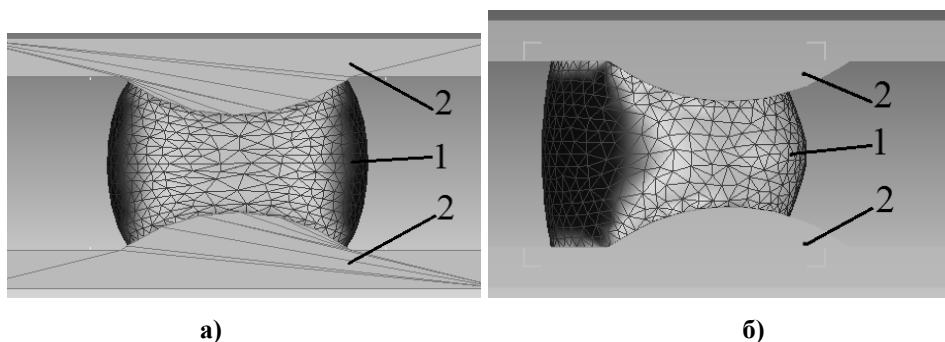


Рис. 2. Твердотельная модель заготовки (1) после осадки выпуклыми бойками (2): а – без эксцентриситета  $e = 0$ ; б – с эксцентриситетом  $e = 0,25$

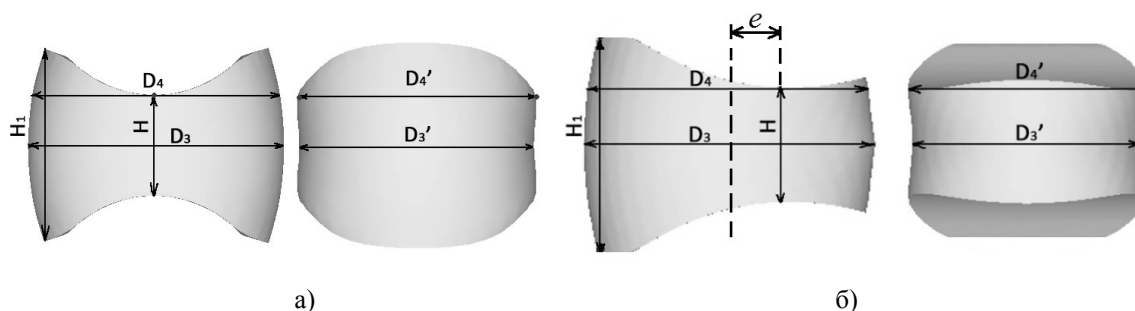


Рис. 3. Схема обмера заготовки после осадки выпуклыми бойками: а – без эксцентриситета  $e = 0$ ; б – с эксцентриситетом  $e = 0,25$

Таблица 1. План полнофакторного эксперимента

Факторы	$\varepsilon_h$	$R / D_0$	$H_0 / D_0$	$e / D_0$	$h_p / D_0$
Обозначение фактора,	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Нижний уровень,	0,2	0,6	1	0	7.5
Верхний уровень,	0,5	2,25	2	0,25	112.5
Нулевой уровень,	0,35	1,425	1,5	0,125	52.5
Интервал варьирования,	0,15	0,825	0,5	0,125	60

Исследование формоизменения проводили в диапазоне степеней обжатий от 0,2 до 0,5. По данным моделирования были рассчитаны макропоказатели формоизменения, для которых составляли уравнения регрессии. В качестве основных факторов, влияющих на формоизменение, были выделены: (фактор) – относительная степень деформации; ( $X_2$ ) – отношение радиуса деформирующего инструмента к исходному диаметру заготовки; ( $X_3$ ) – отношение исходных размеров заготовки; ( $X_4$ ) – отношение величины эксцентриситета нагрузки к исходному диаметру заготовки; ( $X_5$ ) – отношение высоты выпуклости профиля инструмента к исходному диаметру заготовки.

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

В работе рассматривали линейную регрессионную модель с учетом парных взаимодействий. В качестве плана вычислительного эксперимента использовали двухуровневый полнофакторный эксперимент (ПФЭ)  $2^5$  [9,10].

Зависимость показателей формоизменения от влияющих факторов

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (1)$$

представляли в виде линейного уравнения регрессии с учетом всех взаимодействий:

$$\begin{aligned} Y = & b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_1 \cdot X_2 + b_7 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ & + b_8 \cdot X_1 \cdot X_4 + b_9 \cdot X_1 \cdot X_5 + b_{10} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{12} \cdot X_2 \cdot X_5 + \\ & + b_{13} \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{14} \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{15} \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{16} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{17} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ & + b_{18} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 + b_{19} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{20} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{21} \cdot X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ & + b_{22} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{25} \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ & + b_{26} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{27} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{28} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ & + b_{29} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{30} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{31} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5, \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

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

Кодированные значения факторов на верхнем и нижнем уровнях:

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

Выполняли реализацию моделирования согласно плану полного факторного эксперимента по методике планирования  $2^5$  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, исходя из гипотетического предположения проведения двух параллельных опытов. Задавались уровнем надежности  $\alpha$ . Тогда табличное значение критерия Кохрена для моделирования формоизменения стальных заготовок  $G_{табл} = 0,2817$  [9, 10]. Дисперсии считают однородными, когда расчетное значение  $G$ , что требует проверки. При постоянном значении внесенной дисперсии  $S^2 = S_{max}^2 = 0,0001$  расчетные значения  $G_p = 0,0312 < G_{табл} = 0,2817$ . Следовательно, внесенные дисперсии однородны. Критические значения критериев Фишера для оценки адекватности регрессионной модели [9, 10]:  $F_{кр} = 2,9$ . В случае, когда расчетный критерий Фишера  $F$  меньше критического, т.е.  $F < F_{кр}$ , модель является адекватной. Оценку каждого коэффициента уравнений регрессии проводили по  $t$  – критерию Стьюдента, которые определены как [9, 10]:  $t_{\alpha, f} = 2,036$ . Проводили моделирование изменения макропоказателей:  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7$ .

Переход от кодированных значений к натуральным выполняли как

$$\begin{aligned} X_1 = & (\varepsilon_h - 0,35) / 0,15; X_2 = (R / D_0 - 1,425) / 0,825; X_3 = (H_0 / D_0 - 1,5) / 0,5; \\ X_4 = & (e / D_0 - 0,125) / 0,125; X_5 = (h_p - 1,2) / 1,05. \end{aligned} \quad (5)$$

В табл. 2 и табл. 3 приведены примеры расчётов коэффициентов уравнений регрессии для описания изменения макропоказателей  $Y_3$  и  $Y_4$ . Аналогичные расчёты коэффициентов уравнений регрессии получены для макропоказателей  $Y_1, Y_2, Y_5 - Y_7$  (в данной статье не приводятся).

**Таблица 2. Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя**

Макро-показатели	Коэффициенты уравнения регрессии						
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
	1,34087	0,15863	-0,08034	-0,07593	0,07562	-0,05999	-0,05157
$Y_3 = H_1/H$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$
	-0,04525	0,04445	-0,05423	-0,00172	0,01437	0,05977	0,00457
	$b_{14}$	$b_{15}$	$b_{16}$	$b_{17}$	$b_{18}$	$b_{19}$	$b_{20}$
	0,00399	-0,02213	0,00296	0,00264	0,05478	-0,00202	0,00621
	$b_{21}$	$b_{22}$	$b_{23}$	$b_{24}$	$b_{25}$	$b_{26}$	$b_{27}$
	-0,01794	-0,01508	0,00824	0,02783	-0,01048	-0,01020	-0,00190
	$b_{28}$	$b_{29}$	$b_{30}$	$b_{31}$	-	-	-
	0,02079	-0,01176	0,01230	0,01138	-	-	-
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена		
	$F = 2,27549 < F_{кр} = 2,9$				$G_p = 0,0312 < G_{табл} = 0,2817$		

**Таблица 3. Расчёт коэффициентов уравнения (2) для показателя**

Макро-показатели	Коэффициенты уравнения регрессии						
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
	1,22501	0,14129	0,03290	0,00723	-0,01161	-0,00181	0,01778
$Y_4 = D_3/D_0$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$
	0,00826	-0,00605	0,00515	0,00820	0,00978	-0,00657	-0,00242
	$b_{14}$	$b_{15}$	$b_{16}$	$b_{17}$	$b_{18}$	$b_{19}$	$b_{20}$
	0,01249	0,00142	0,00447	0,00300	-0,00310	-0,00159	0,00649
	$b_{21}$	$b_{22}$	$b_{23}$	$b_{24}$	$b_{25}$	$b_{26}$	$b_{27}$
	0,00451	-0,00117	-0,00502	-0,00716	0,00772	0,00035	-0,00493
	$b_{28}$	$b_{29}$	$b_{30}$	$b_{31}$	-	-	-
	-0,00698	0,00496	-0,00133	-0,00242	-	-	-
	Критерий Фишера				Критерий Кохрена		
	$F = 1,82273 < F_{кр} = 2,25$				$G_p = 0,0312 < G_{табл} = 0,2817$		

Результаты позволяют прогнозировать формоизменение цилиндрических заготовок в процессах профилирования осадкой выпуклыми продолговатыми вставками с различной высотой профиля. Оценка значимости факторов показывает существенное влияние на формоизменение относительной степени деформации  $\varepsilon_h$ , отношения радиуса деформирующего инструмента к исходному диаметру заготовки, отношения исходных размеров заготовки, отношения величины эксцентриситета нагрузки к исходному диаметру заготовки, отношения высоты выпуклости профиля инструмента к исходному диаметру заготовки  $h_p / D_0$  в исследуемых пределах. При этом на характеристику высотной деформации значимо влияет только факторы и, а на характеристику продольной деформации степень деформации осадки существенного влияния не оказывает.

В перспективе, полученные результаты целесообразно положить в основу разработки методики расчёта переходов штамповки поковок различной конфигурации на основе профилирующей осадки с эксцентриситетом нагрузки.

**Выводы.** Проведено моделирование формоизменения заготовок из стали 38ХС в программном комплексе для конечно-элементного моделирования Defo<sub>гm</sub> при осадке выпуклыми продолговатыми вставками с наличием эксцентриситета их внедрения в торцы заготовок при различной высоте профиля. Установлены зависимости изменения основных показателей неравномерности деформации по высоте, а также в продольном и поперечном направлении от технологических факторов и геометрических характеристик заготовок и рабочего инструмента. Адекватность полученных регрессионных моделей подтверждается значениями критерия Фишера (максимальное значение  $F = 2,27549 < F_{кр} = 2,9$ ), а воспроизводимость – величинами критерия Кохрена .

#### Литература

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. / ДГМА. – Краматорск, 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 (галузеве 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.

© В.В. Кухарь, Р.С. Ніколенко

*В.В. Кухар, д. т. н., професор*

*Р.С. Ніколенко, аспірант*

*ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»*

### **ФОРМОЗМІНА ЗАГОТОВОК ПРИ ЕКСЦЕНТРИЧНОМУ ОСАДЖУВАННІ ОПУКЛИМИ ВСТАВКАМИ З РІЗНОЮ ВИСОТОЮ ПРОФІЛЮ**

*Розроблено методику дослідження формозміни циліндричних заготовок при ексцентричному осаджуванні опуклими вставками з різною висотою профілю в пакеті комп'ютерного кінцево-елементного моделювання з застосуванням методики планування експерименту. В результаті досліджень отримані закономірності, які дозволяють прогнозувати макропоказники формозміни циліндричної заготовки при ексцентричному осаджуванні опуклими вставками, що враховують вихідні розміри заготовки, конструкцію інструменту і величину ексцентриситету.*

**Ключові слова:** *циліндрична заготовка, ексцентричне осаджування, опуклі бойки, формозміна, планування експерименту.*

*V.V. Kukhar, D Sc., Professor*

*R.S. Nikolenko, Post Graduate*

*SHEI "Priazovskyi State Technical University"*

### **THE FORMING OF THE BILLETS AT THE ECCENTRIC UPSETTING BY CONVEX DIE-INSERTS WITH DIFFERENT HEIGHT OF PROFILE**

*The technique of study of the forming of cylindrical workpieces at eccentric upsetting by convex die-inserts with varying of height of the profile in a package of computer finite element modelling with using of the method of experiment planning is developed. The patterns for allow to predict the change of macro-indexes of forming of cylindrical workpieces during upsetting by convex die-inserts that taking into account the original dimensions of the workpiece, the tool design and the eccentricity value was provided as result of studies.*

**Keywords:** *cylindrical billet, eccentric upsetting, convex die-insert, forming, planning of the experiment.*