

УДК 621.98

Балалаева Е. Ю.

## РАСЧЕТ УНИВЕРСАЛЬНЫХ УПРУГИХ ПОВОРОТНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ «ПРЕСС-ШТАМП» ДЛЯ ОПЕРАЦИИ ВЫТЯЖКИ-ФОРМОВКИ

Технологические операции, выполняемые на физически устаревших кривошипных прессах, сопровождаются перекосами ползуна, что снижает стойкость инструмента и усугубляет условия его эксплуатации [1], при этом снижается качество отштампованных изделий и точность поверхности реза на разделительных операциях.

Широкое распространение получили компенсаторы, рассчитанные на определенное технологическое усилие, например, компенсатор погрешностей направления ползуна пресса в виде полиуретановой пластины, повторяющей форму верхней плиты штампа [2–5]. Данная конструкция характеризуется переменной жесткостью за счет наличия отверстий, расположенных с различным шагом в каждом направлении. Эффективность использования таких компенсаторов на базе полиуретана определяется его свойствами, т. к. упругая пластина при осадке ее до 25 % выдерживает до  $7 \cdot 10^6$  циклов нагружения сжатия. Результаты эксплуатации дали основания доработать конструкцию, что позволило повысить ее стойкость.

Недостатком вышеперечисленных устройств является фиксированная общесредняя жесткостью, которая ограничивает диапазон расчетных технологических усилий и необходимости замены компенсатора в случае изменения параметров технологических процессов.

Для решения поставленной проблемы была разработана конструкция универсального компенсатора погрешностей (рис. 1) в соответствии с источником [6], основой которого служит составной предварительно напряженный упругий элемент, выполненный в виде двух жестких, например круглых, пластин из полиуретана с отверстиями, причем одна из пластин имеет возможность перемещаться поворотом относительно другой, что позволяет менять площадь опорной поверхности и приводит к изменению жесткости компенсатора за счет варьирования коэффициентом перекрытия, расширяя диапазон технологических операций.

Целью работы является разработка автоматизированной методики расчета универсальных поворотных упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» на примере операции вытяжки-формовки.

Предварительно были проведены испытания образцов из полиуретана марки СКУ-ПФЛ-100 различной формы на сжатие. При обработке опытных данных значения давления сжатия  $q$  вычисляли как  $q = P/F_{\text{опорн}}$ , где  $P$  – сила деформирования,  $F_{\text{опорн}}$  – площадь опорной поверхности компенсатора.

Зависимость давления сжатия полиуретана  $q$  от степени осадки  $\varepsilon$  для  $\varepsilon \leq 0,2 \div 0,3$ :  
 $q = 52\varepsilon + 1,92$ .

В результате исследования коэффициента формы  $\Phi$ , определяемого по формуле:  $\Phi = F_{\text{бок}}/F_{\text{опорн}}$ , где  $F_{\text{бок}}$  – площадь боковой поверхности компенсатора, согласно данным работы [7] на основе разработанной математической модели и программного обеспечения были получены зависимости усилия сжатия от коэффициента формы и степени осадки без смазки (1) и со смазкой (2):

$$P = 0,001436 - 0,164223 \cdot \Phi - 0,289477 \cdot \varepsilon + 25,110390 \cdot \Phi \cdot \varepsilon; \quad (1)$$

$$P = -0,000434 - 0,000613 \cdot \Phi - 0,086781 \cdot \varepsilon + 0,128789 \cdot \Phi \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

Рассматривали конструкцию универсального компенсатора погрешностей направления ползуна (рис. 1), основой которого служит составной предварительно напряженный упругий элемент, выполненный в виде двух жестких круглых пластин радиусом  $R$  из полиуретана СКУ-ПФЛ-100 с отверстиями радиусом  $r_1$  и  $r_2$  соответственно.

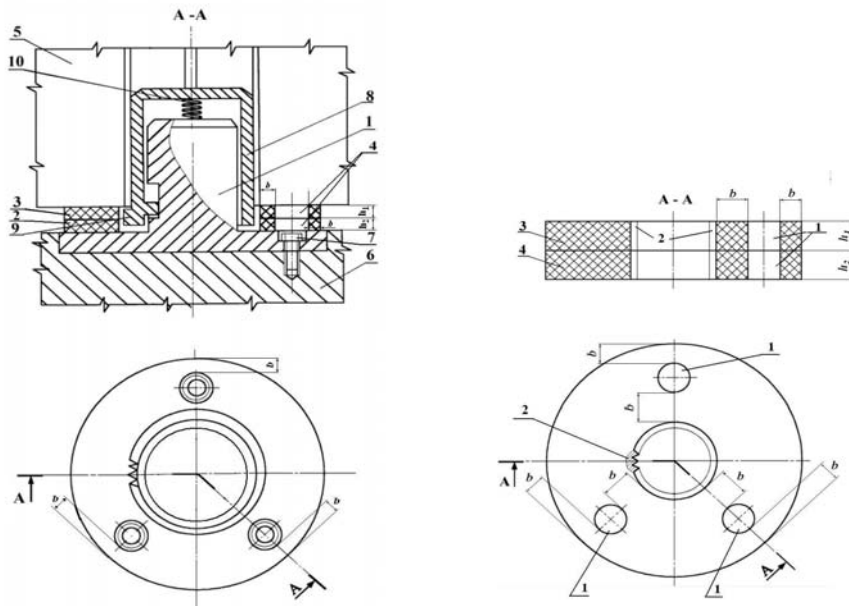


Рис. 1. Универсальный компенсатор погрешностей направления ползуна (1 – хвостовик; 2 и 3 – нижняя и верхняя упругие пластины; 4 – отверстия в упругих пластинах; 5 – ползун прессы; 6 – верхняя плита штампа; 7 – винтовое соединение хвостовика и верхней плиты штампа; 8 – колпак; 9 – зуб колпака для фиксации повернутой упругой пластины; 10 – пружина; А-А – обозначение разреза)

Схема перекрытия отверстий двух поворотных пластин универсального компенсатора погрешностей направления ползуна представлена на рис. 2. При этом задачу рассматривали для случая, когда радиусы отверстий  $r_1$  и  $r_2$  могут не совпадать.

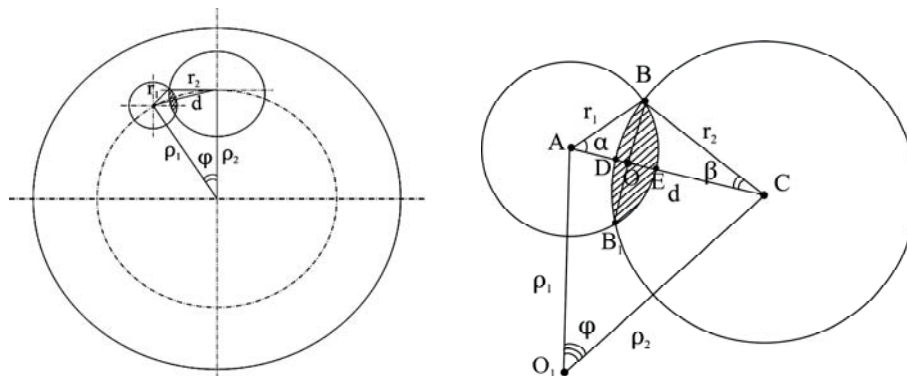


Рис. 2. Схема перекрытия отверстий пластин универсального компенсатора погрешностей направления ползуна ( $d$  – расстояние между центрами отверстий пластин компенсатора;  $\rho_1$  – расстояние от оси вращения до центра меньшего отверстия пластины;  $\rho_2$  – расстояние от оси вращения до центра большего отверстия;  $\varphi$  – угол между лучами, идущими из общего начала в центры отверстий пластин)

Расстояния  $a$  и  $b$  между соседними отверстиями в упругих пластинах и между отверстием и стенкой компенсатора согласно [6] составляют:

$$a \geq 0,63(h_1 + h_2) \quad b \geq 0,63(h_1 + h_2), \quad (3)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – толщины верхней и нижней упругих пластин соответственно, причем разница между толщиной верхней и нижней упругих пластин не превышает 20 %.

При этом в конструкцию были введены следующие ограничения: радиусы упругих пластин компенсатора должны быть меньше длина и ширины штамповой плиты ( $R < A$

и  $R < B$  соответственно), а высота компенсатора не должна превышать  $1/3$  штампового пространства ( $(h_1 + h_2) \leq H_{np}/3$ ). Опорные площади пластин компенсатора определяли по формуле  $F_{опорн.пл} = \pi R^2$ .

Перекося ползуна на угол  $\varphi_0$  обуславливает неравномерность деформации пластин универсального поворотного компенсатора по высоте. Причем максимальный угол отклонения не должен превышать  $\varphi_0 \leq \arctg((h_1 + h_2)/2R)$ .

Исходя из введенных ограничений, радиусы упругих пластин компенсатора определяли как:  $R = 0,9 \cdot C_{AB}/2$ , где  $C_{AB} = \min(A, B)$ .

Одна из упругих пластин компенсатора имеет возможность перемещаться поворотом относительно другой. Это позволяет менять площадь опорной поверхности и приводит к изменению жесткости компенсатора, которая вычисляется по формуле:

$$C = P/\Delta, \quad (4)$$

где  $P$  – сила сжатия;  $\Delta$  – величина осадки компенсатора.

Коэффициент перекрытия  $K_{пер}$ , варьирование которым осуществляется при сдвиге верхней пластины, определяется как:

$$K_{пер} = F_{пер.отв} / F_{отв}, \quad (5)$$

где  $F_{пер.отв}$  – площадь перекрытия отверстий двух пластин;  $F_{отв}$  – площадь отверстия пластины.

Согласно данным работ [8, 9] коэффициент перекрытия по отношению к меньшему отверстию упругой пластины универсального компенсатора погрешностей направления ползуна: рассчитывали по формуле:

$$K_{пер} = \frac{1}{\pi} \left( \arcsin A - A\sqrt{1-A^2} + \omega^2 \arcsin \frac{A}{\omega} - \frac{1}{2} \sqrt{\omega^2 - A^2} \right), \quad (6)$$

где  $\omega = r_2/r_1$ ;  $A = \sin \alpha$  (согласно схеме на рис. 2).

Коэффициент формы  $\Phi$  определяли как:

$$\Phi = F_{бок} / F_{опорн}, \quad (7)$$

где  $F_{бок} = 4\pi R(h_1 + h_2)$  – боковая площадь компенсатора;  $F_{опорн} = (2F_{опорн.пл} - F_{пер.пл})$  – опорная площадь компенсатора ( $F_{пер.пл}$  – площадь перекрытия двух пластин).

В рассматриваемом случае учитывается неравномерность деформации, обусловленная перекося ползуна на угол  $\varphi$  при определенном технологической силе сжатия  $P$ . Величина угла перекося определяется как:  $\varphi_0 = \arctg(\Delta_{комн}/2R)$ , где  $\Delta_{комн} = 2,5 \cdot \Delta_{пресс}$  – максимальный перекося компенсатора, здесь  $\Delta_{пресс} = P/C$  – максимальный перекося прессы;  $C$  – жесткость прессы открытого типа,  $C = 300 \dots 1200$  [10].

Деформация компенсатора при сдавливании не должна превышать 20–25 % от его высоты пластин. Тогда общая высота пластин компенсатора может быть найдена как  $(h_1 + h_2) = \Delta_{комн}/0,2$ . Разница между  $h_1$  и  $h_2$  находится в диапазоне от 0 % до 20 %.

В работе рассматривали использование универсального поворотного упругого компенсатора погрешностей системы пресс-штамп при вытяжке-формовке детали. На рис. 3 приведена обобщенная схема процесса первой операции вытяжки [11].

На начальной стадии операции вытяжки детали цилиндрического типа без фланца силу рассчитывали по формуле [10]:

$$P_{e0} = \pi \cdot d_1 \cdot S \cdot \sigma_e \cdot k, \quad (8)$$

где  $\sigma_{\epsilon}$  – предел прочности материала листовой заготовки;  $k_1$  – коэффициент для первой вытяжки ( $k_1 = 0,8$ ).

Текущую силу операции вытяжки определяли как [11]:

$$P_{\epsilon} = \beta \cdot \sigma_{cp} \cdot (1 + fA) \cdot \left( \ln \frac{R}{r_1} - fA \right) + \frac{fQ}{\pi RS} + \frac{S}{2r_{1M} + S} \cdot \sigma_{\epsilon}, \quad (9)$$

где  $\beta = 1,1$ ;  $\sigma_{cp} = 0,5\sigma_{\epsilon}$ ;  $f$  – коэффициент трения, зависящий от рода материала и смазки (принимали  $f = 0,128$ );  $A = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi a}{90\sqrt{a^2 - 1}} \arctg \frac{a+1}{\sqrt{a^2 - 1}}$ , здесь  $a = 1 + \frac{x_1}{r_{1M} + 0,5S}$ ,

$x_1 = \frac{d_1 - S}{2}$ ;  $R = D_n/2$  – радиус листовой заготовки (см. рис. 3);  $r_1 = d_1/2$  – радиус детали после вытяжки (см. рис. 3);  $Q = \pi \left( (D - 2L_x)^2 + (d_1 + 2r_{1M})^2 \right) / 4$  – давление прижима, здесь  $L_x$  – ход ползуна. При этом конечную высоту заготовки на данном этапе вычисляли  $L_{\epsilon} = (D - d_1)/2 - h_{отв}$ , где  $h_{отв}$  – высота формируемых углублений.

Сила деформирования на этапе вытяжки-формовки определи по формулам [10, 11]:

$$P_{\epsilon\phi} = P_{\epsilon} + P_{\phi}, \quad P_{\phi} = n \cdot F_x \cdot k \cdot S^2 \cdot \sigma_{\epsilon}(\epsilon), \quad (10)$$

где  $P_{\phi}$  – усилие формовки;  $n$  – число формируемых углублений;  $k$  – фактор трения (принимали  $k = 0,8$  [10]);  $\epsilon$  – степень осадки;  $F$  – площадь штампуемого рельефа. Изменение площади  $F_x$  от  $\pi d_{отв.в}^2/4$  до  $\pi d_{отв.к} \cdot h$  и изменение диаметра углубления  $d_x$  от  $d_{отв.н}$  до  $d_{отв.к}$  носят линейный характер.

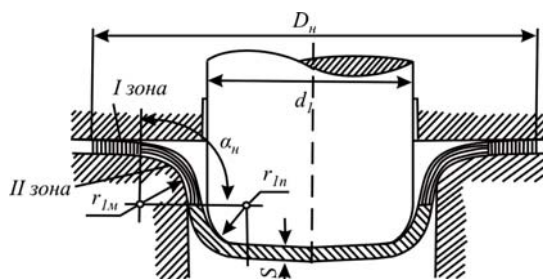


Рис. 3. Обобщенная схема процесса первой операции вытяжки (I зона – плоскость прижима; II зона – зона на закругленной части матрицы;  $D_n$  – текущий диаметр листовой заготовки;  $d_1$  – диаметр вытянутой детали;  $r_{1n}$  мм и  $r_{1m}$  – радиусы закругления пуансона и матрицы;  $\alpha_m$  – угол закругления матрицы;  $S$  – толщина листовой заготовки)

В результате обработки справочных данных [12] получена зависимость:

$$\sigma_{\epsilon}(\epsilon) = -1115,4\epsilon^2 + 2129,2\epsilon + 394,35. \quad (11)$$

Величину  $\epsilon$  определяли по формуле:  $\epsilon = 1 - 0,5 \left( \rho_n + m'_1 / \sqrt{1 - \rho_n^2 + m'^2_1} \right)$ , где  $m'_1 = R_{вн} / d_{отв.в}$ ,  $\rho_1 = R_n / d_{отв.в}$ , здесь  $R_{вн} = (d_x - S')/2$  и  $R_n = (d_x + S')/2$  – внутренний и наружный радиусы углубления,  $S' = S \sqrt{d_{отв.в} / d_x}$  – толщина стенки углубления.

На основе разработанной математической модели написано программное обеспечение в среде Borland Delphi 7, интерфейс которого показан на рис. 4. В качестве исходных данных задавали размеры штамповой плиты  $A = 300$  мм и  $B = 300$  мм. Моделировали операцию

формовки-вытяжки детали «Днище нижнее» для огнетушителей типа ОП-6 (рис. 5). Радиусы закругления пуансона и матрицы  $r_{1n} = 20$  мм и  $r_{1m} = 20$  мм соответственно. Операция формовки предназначена для получения 5 углублений, которые располагаются на расстоянии 60 мм от оси детали. Материал используемых листовых заготовок – Ст3, толщина  $S = 1,4$  мм, исходный диаметр  $D = 260$  мм. Размеры детали представлены на чертеже (см. рис. 5).

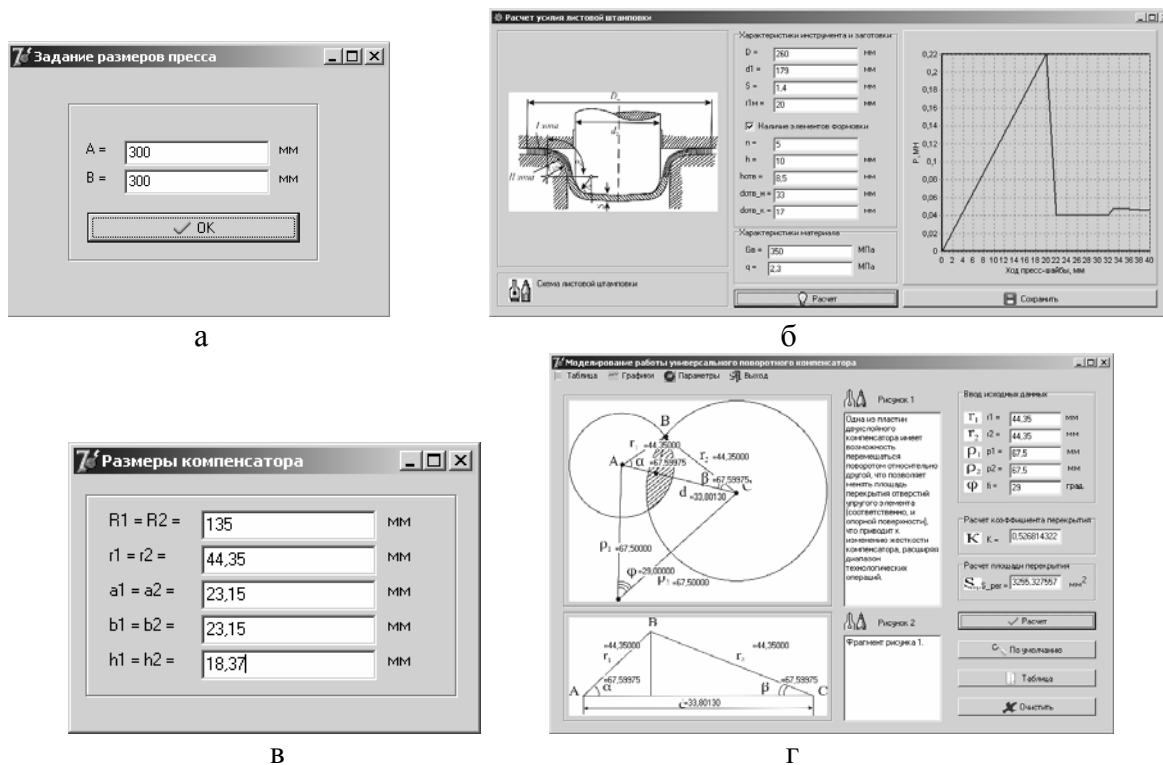


Рис. 4. Интерфейс программного обеспечения:

а – задание размеров плиты пресса; б – расчет силовых режимов операции вытяжки-формовки; в – расчет размеров компенсатора; г – результаты моделирования работы универсального поворотного компенсатора

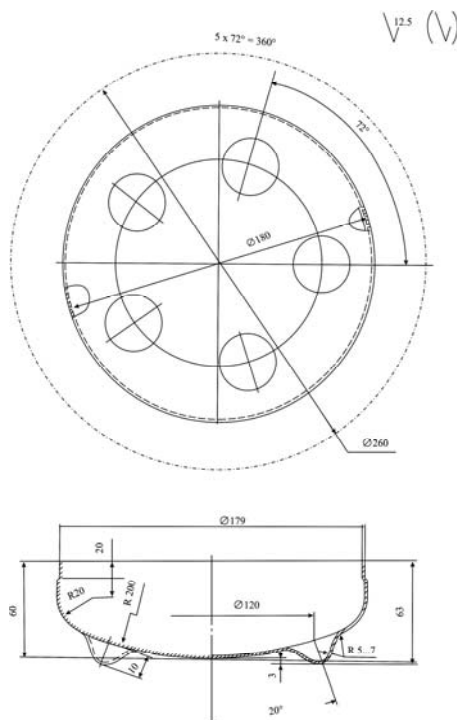


Рис. 5. Чертеж детали «Днище нижнее» для огнетушителей типа ОП-6

На основе полученных данных рассчитаны начальные размеры универсального упругого поворотного компенсатора (рис. 4, в): радиусы упругих пластин  $R_1 = R_2 = 135$  мм, радиус отверстий пластин  $r_1 = r_2 = 44,35$  мм, расстояния между соседними отверстиями в упругих пластинах и между отверстием и стенкой компенсатора  $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 23,15$  мм, высота пластин  $h_1 = h_2 = 18,37$  мм. Установлено, что для достижения оптимальной жесткости компенсатора, необходимо повернуть верхнюю упругую пластину на угол  $\varphi = 29$  град.

### ВЫВОДЫ

Упругие компенсаторы являются перспективным малозатратным направлением снижения перекосов в системе «пресс-штамп» прессового оборудования. Разработана математическая модель и программное обеспечение для расчета параметров работы универсальных поворотных упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп».

Программный продукт позволяет: 1) рассчитывать силу сжатия компенсатора в зависимости от выполняемой технологической операции; 2) вычислять коэффициент формы упругого компенсатора и определять его оптимальные геометрические размеры; 3) рассчитывать коэффициент перекрытия и определять оптимальный угол поворота верхней пластины компенсатора для достижения необходимой жесткости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Диамантопуло К. К. Компенсация несоосности системы «пресс-штамп» изношенного штамповочного оборудования / К. К. Диамантопуло, В. В. Кухарь, А. И. Евтеев // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2005. – № 2. – С. 31–34.
2. Диамантопуло К. К. Компенсатор погрешностей направления ползуна прессов / К. К. Диамантопуло, В. Е. Гримани // *Защита металлургических машин от поломок: сб. научн. тр.* – Мариуполь, 1998. – Вып. 3. – С. 168–173.
3. Диамантопуло К. К. Полиуретановый компенсатор погрешностей направления ползуна прессов открытого типа / К. К. Диамантопуло, В. Е. Гримани, В. В. Кухарь // *Общегородская научно-практическая конф. «Университет и город»*. : Тез. доклад. – Мариуполь, 2000. – Секц. 1. – С. 24–25.
4. Пат. 11782 Україна, МПК(2006) В 21 В 23/00. Компенсатор похибок напряму переміщення повзуна преса / Диамантопуло К. К., Кухарь В. В., Єрмолов Д. В. (Україна); заявник і патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № и 200505677; заявл. 13.06.2005; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 4 с.; ил.
5. Пат. 837 Україна, МПК(2006) В 21 В 23/00. Компенсатор похибок / Диамантопуло К. К., Василевський О. В. (Україна); заявник і патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № 2000074079; заявл. 11.07.2000; опубл. 14.11.2001, Бюл. № 11. – 2 с.; ил.
6. Пат. 38814 Україна, МПК(2006) В 30 В 15/28; В 21 В 23/00. Універсальний компенсатор похибок напряму повзуна / Кухарь В. В., Балалаева О. Ю., Макеев В. С. (Україна); заявник і патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № и 20086973; заявл. 20.05.2008; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2. – 4 с.; ил.
7. Балалаева Е. Ю. Экспериментальное исследование работы упругих двухслойных элементов универсального компенсатора погрешностей системы «пресс-штамп» методом планирования эксперимента / Е. Ю. Балалаева // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*: сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 37'2009. – С. 42–50.
8. Кухарь В. В. Аналитическое исследование работы универсального упругого компенсатора погрешностей направления ползуна / В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева // *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*: зб. наук. пр. – Кременчук, 2008: КДПУ. – Вып. 5/2008 (52). – Часть 2. – С. 57–60.
9. Кухарь В. В. Математическое моделирование и автоматизация расчетов универсальных поворотных компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» [Электронный ресурс] / В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева // *Научный вестник ДГМА. – Краматорск, 2009. – № 1 (4Е) – С. 118–122. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/publish/2009/2009\\_1/article/09KVVEPS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/publish/2009/2009_1/article/09KVVEPS.pdf)*
10. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский. – М.: Машигиз, 1959. – 400 с.
11. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: уч. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / М. Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1967. – 504 с.
12. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.

Балалаева Е. Ю. – аспирант ПГТУ.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: te\_quiero@list.ru