

УДК 621.98

Тузенко О. А.  
Балалаева Е. Ю.  
Кухарь В. В.  
Бурко В. А.

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА УНИВЕРСАЛЬНЫХ ПОВОРОТНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ «ПРЕСС-ШТАМП» ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПЕРАЦИИ ПРЕССОВАНИЯ

Для снижения упругих деформаций в узлах прессового оборудования применяют различные компенсирующие элементы, снижающие погрешности системы «пресс-штамп». При этом использование механических компенсаторов погрешностей направления ползуна оправдано лишь при прецизионной штамповке тонколистовых деталей, что связано с их сложной кинематикой, требованием высокоточных качеств на изготовление, а также громоздкостью конструкций, занимающих до 1/3 высоты штампового пространства, что обуславливает их значительную стоимость и невысокую надежность.

Перспективным направлением снижения перекосов в системе «пресс-штамп» является использование различных конструкций компенсаторов, основой которых служат упругие пластины различной жесткости по длине и ширине, а также эластичные элементы крепежа штампа к ползуну пресса [1, 2]. Однако все вышеперечисленные устройства обладают фиксированной общесредней жесткостью, что приводит к ограничению диапазона технологических нагрузок, на которые рассчитана конструкция компенсатора. В случае изменения силовых режимов при смене технологической операции или штамповки другой детали необходимо проводить замену компенсатора на новый, с другими эксплуатационными характеристиками.

При широкой номенклатуре продукции целесообразно использование универсальных компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп», основой которых, в соответствии с источниками [3, 4], 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.

Однако использование универсальных поворотных компенсаторов требует предварительного уточнения их конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик. При этом используемые методы подбора и оптимизации конструктивных параметров упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» требуют алгоритмизации методик расчета и разработки автоматизированных модулей, интегрированных в единый программный продукт, с использованием сред визуального объектно-ориентированного программирования.

Целью работы является разработка программного обеспечения для расчета универсальных поворотных упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» на примере операции прессования профилей.

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  $R$  с отверстиями радиусом  $r_1$  и  $r_2$  соответственно. Высоту компенсатора определяли как  $H_0 = h_1 + h_2$ , где  $h_1$  и  $h_2$  – высоты упругих пластин. 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.

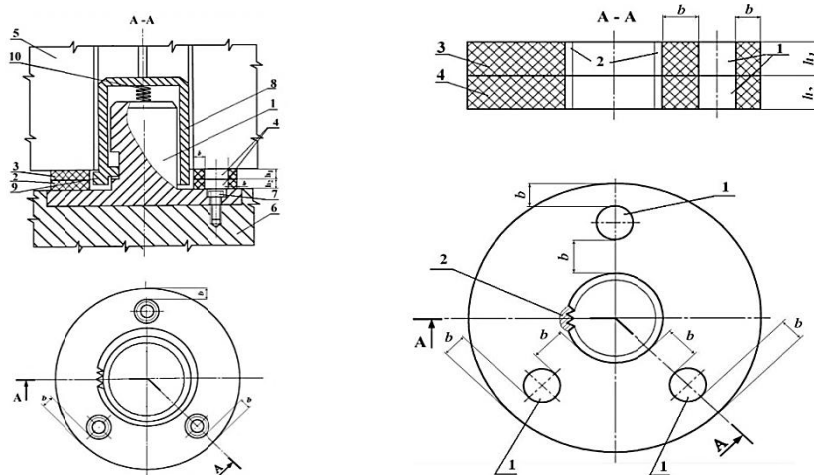


Рис. 1. Универсальный компенсатор погрешностей направления ползуна:

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

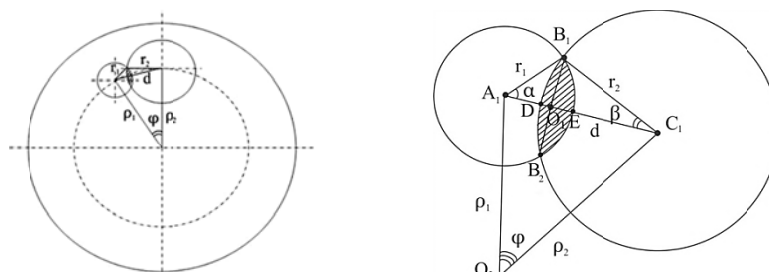


Рис. 2. Схема перекрытия отверстий пластин универсального компенсатора погрешностей направления ползуна:

$r_1$  и  $r_2$  – радиус меньшего и большего отверстий пластин соответственно;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – расстояния от оси вращения до центра отверстия верхней и нижней пластин соответственно;  $\varphi$  – угол между лучами, идущими из общего начала в центры отверстий пластин

В конструкцию компенсаторов вводили следующие ограничения:

– внешний радиус  $R$  пластин универсального поворотного компенсатора должен быть меньше длины и ширины штамповой плиты ( $R < A$  и  $R < B$  соответственно);

– высота компенсатора  $H_0$  не должна превышать  $1/3$  штампового пространства прессы ( $H_0 \leq H_{np}/3$ );

– максимальный угол перекоса не должен превышать  $\varphi \leq \arctg(H_0/2R)$ .

Исходя из введенных ограничений, внешний радиус компенсатора определяли как:

$$R = 0,9 \cdot C_{AB}/2, \quad (1)$$

где  $C_{AB} = \min(A, B)$ .

Внутренний радиус компенсатора определяли как:

$$R_n = 1,1 \cdot d_{xв}/2. \quad (2)$$

Величину угла перекоса компенсатора рассчитывали по формуле:

$$\varphi = \arctg(\Delta_{комп}/2R), \quad (3)$$

где  $\Delta_{комп} = 2 \div 3 \cdot \Delta_{пресс}$  – максимальный перекоса компенсатора (здесь  $\Delta_{пресс} = P/C$  – максимальный перекоса прессы; при этом  $P$  – технологическая сила;  $C$  – жесткость прессы).

Силу  $P$  определяли на каждой стадии заданной технологической операции.  
Давление сжатия  $q$  вычисляли по формуле:

$$q = P/F, \quad (4)$$

где  $P$  – сила сжатия;

$F$  – площадь полиуретанового образца.

Степень деформации упругого компенсатора  $\varepsilon$  находили из выражения (5), при этом  $\varepsilon \leq 30\%$  [5]:

$$q = 52\varepsilon + 1,92. \quad (5)$$

Коэффициент формы  $\Phi$  определяли из выражений (6) и (7) для максимального значения технологической силы  $P$  [5]:

– зависимость  $P(\Phi, \varepsilon)$  без использования смазки:

$$P = 0,001436 - 0,164223 \cdot \Phi - 0,289477 \cdot \varepsilon + 25,110390 \cdot \Phi \cdot \varepsilon; \quad (6)$$

– зависимость  $P(\Phi, \varepsilon)$  с использованием смазки:

$$P = -0,000434 - 0,000613 \cdot \Phi - 0,086781 \cdot \varepsilon + 0,128789 \cdot \Phi \cdot \varepsilon. \quad (7)$$

Исходя из определения коэффициента формы  $\Phi$  (8), находили начальные конструктивные параметры упругих компенсаторов:

$$\Phi = F_{бок} / F_{опорн}, \quad (8)$$

где  $F_{бок}$  – площадь свободной боковой поверхности компенсатора вместе с боковой поверхностью отверстий;

$F_{опорн}$  – площадь опорной поверхности компенсатора.

Коэффициент перекрытия  $K_{пер}$  упругих пластин универсального поворотного компенсатора, варьирование которым осуществляется при повороте верхней пластины, определяется по формуле:

$$K_{пер} = F_{пер.отв} / F_{отв}, \quad (9)$$

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

$F_{отв}$  – площадь отверстия пластины.

Площади боковой и опорной поверхностей компенсатора определяли как  $F_{бок} = 4\pi R(h_1 + h_2)$  и  $F_{опорн} = (2F_{опорн.пл} - F_{пер.пл})$  соответственно (здесь  $F_{пер.пл}$  – площадь перекрытия двух пластин).

Согласно данным работ [5–6], коэффициент перекрытия по отношению к меньшему отверстию упругой пластины универсального компенсатора погрешностей направления ползуна рассчитывали по формуле:

$$K_{пер} = \arcsin A/180^\circ - A\sqrt{1-A^2}/\pi + \omega^2 \arcsin(A/\omega)/180^\circ - \sqrt{\omega^2 - A^2}/2\pi, \quad (10)$$

где  $\omega = r_2/r_1$ ,  $A = \sin \alpha$  (согласно схеме на рис. 1).

Изменяя величину угла поворота пластины, достигали требуемого значения  $K_{пер}$ .

В рассматриваемом случае учитывается неравномерность деформации, обусловленная перекосом ползуна на угол  $\varphi$  при определенной технологической силе сжатия  $P$ . Величина угла перекоса определяется по формуле (3).

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

Рассматривали использование поворотного упругого компенсатора при прессовании с прямым истечением сплошного профиля из заготовки круглого поперечного сечения через одноканальную матрицу (рис. 3).

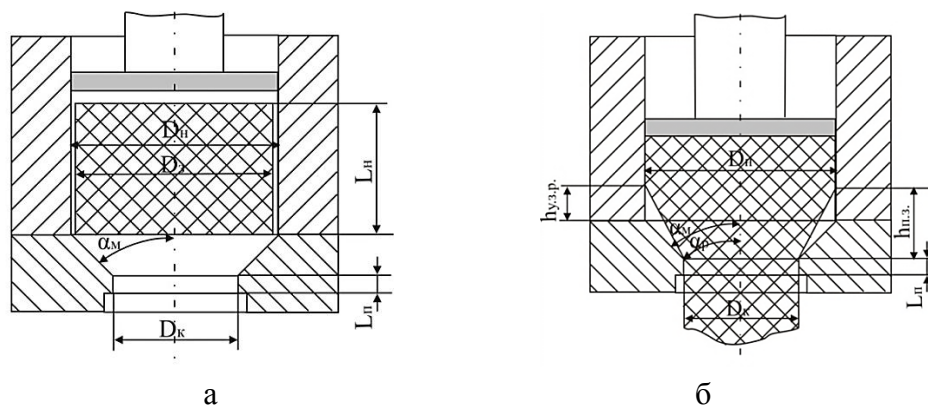


Рис. 3. Прессование с прямым истечением сплошного профиля из круглой заготовки через одноканальную матрицу на стадии распрессовки (а) и начала истечения металла (б) [7]

В зависимости от действительного угла канала ( $\alpha_M$ ) расчетный угол ( $\alpha_p$ ) и расчетную высоту  $h_{y.z.p.}$  определяли по формулам [7]:

$$\begin{cases} \text{если } \alpha_M \leq 60^\circ, & \text{то } \alpha_p = \alpha_M, & h_{y.z.p.} = 0; \\ \text{если } \alpha_M > 60^\circ, & \text{то } \alpha_p = 60^\circ, & h_{y.z.p.} = (D_H - D_K) \cdot (0,58 - \text{ctg} \alpha_M) / 2, \end{cases} \quad (11)$$

где  $D_H$  и  $D_K$  – внутренний и внешний диаметры контейнера.

Объем цилиндрической заготовки вычисляли следующим образом [7]:

$$V_3 = L_H \cdot \pi D_3^2 / 4; \quad D_3 = 0,97 \cdot D_H, \quad (12)$$

где  $L_H$  – высота контейнера;

$D_3$  – диаметр заготовки.

На стадии распрессовки текущий диаметр заготовки определяли как [7]:

$$D_x = 1,13 \cdot \sqrt{V_3 / L_x}, \quad (13)$$

где  $L_x$  – текущая высота заготовки.

Конечную высоту заготовки на данном этапе рассчитывали как [7]:

$$L_{OA} = V_3 / (\pi D_H^2 / 4), \quad (14)$$

Силу прессования на первом этапе вычисляли по формуле [7]:

$$P_{OA} = 20 \cdot \sigma_s \cdot \left[ 1 + 0,09 \cdot (D_x / L_x) \cdot \sqrt{\mu \cdot D_x / L_x} \right] \cdot \pi D_x^2 / 4, \quad (15)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации с учетом упрочнения материала заготовки;

$\mu$  – коэффициент трения ( $\mu = 0,3$ ).

В соответствии с источником [7], силу прессования на стадии истечения металла определяли следующим образом:

$$P = \left[ f_{k.p.} K_{k.p.} \pi D_H (L_H - h_{y.z.p.}) + \frac{\pi D_H^2}{2} K_{m.б.} i \left( \frac{f_{k.m.}}{2 \sin(\alpha_p)} + \frac{1}{\cos^2(\alpha_p / 2)} \right) + \right] 10^{-6} + \\ + \lambda \pi D_K f_{k.n.} K_{m.k.} L_n \cdot 10^{-6}, \quad (16)$$

где  $f_{k.p.} = f_{k.m.} = f_{k.n.} = f = 1$  – показатель внешнего трения;

$K_{k.p.} = K_{m.б.} = K_{m.k.} = K = \sigma_s / (3\sqrt{3})$  – напряжение пластического сдвига;

$i = D_H^2 / D_K^2$  – показатель деформации;  
 $\lambda = 1 / \left[ 1 - \left( (D_H^2 - D_K^2) / D_H^2 \right) \right]$  – коэффициент вытяжки.

Также силу прессования рассчитывали дополнительно по источнику [8]:

$$P = \sigma_s \left[ \left( \frac{\mu + 0,5}{2 \sin(\alpha_M)} + \frac{2}{1 + \cos(\alpha_M)} \right) \ln \left( \frac{D_H^2}{D_K^2} \right) + \frac{2L_x}{D_K} + \frac{4\mu L_n}{D_H} \right] \frac{\pi D_K^2}{4} \cdot 10^{-6}. \quad (17)$$

Также проводили расчет по формуле, приведенной в источнике [9]:

$$P = \sigma_s (1 + f \cdot \operatorname{tg}(\alpha_M)) \left[ 1 + \operatorname{tg}(\alpha_M) + f + f \left( \frac{L_n}{D_K} + \frac{L_x}{D_H} \right) \right] \ln \left( \frac{D_H^2}{D_K^2} \right) \frac{\pi D_H^2}{4} \cdot 10^{-5}. \quad (18)$$

На основе разработанной математической модели написано программное обеспечение в среде Borland Delphi 7, интерфейс которого показан на рис. 4.

Проведено моделирование работы двухслойного компенсатора погрешностей направления ползуна пресса для процесса прессования с прямым истечением сплошного профиля из заготовки круглого поперечного сечения через одноканальную матрицу (рис. 4, а).

Внутренний диаметр, внешний диаметр и высота контейнера соответственно равны  $D_H = 30$  мм,  $D_K = 20$  мм и  $L_H = 30$  мм; высота пояска матрицы  $L_n = 5$  мм; угол канала матрицы  $\alpha_M = 60^\circ$ . Показатель и коэффициент трения соответственно равны  $f = 1$  и  $\mu = 0,3$ .

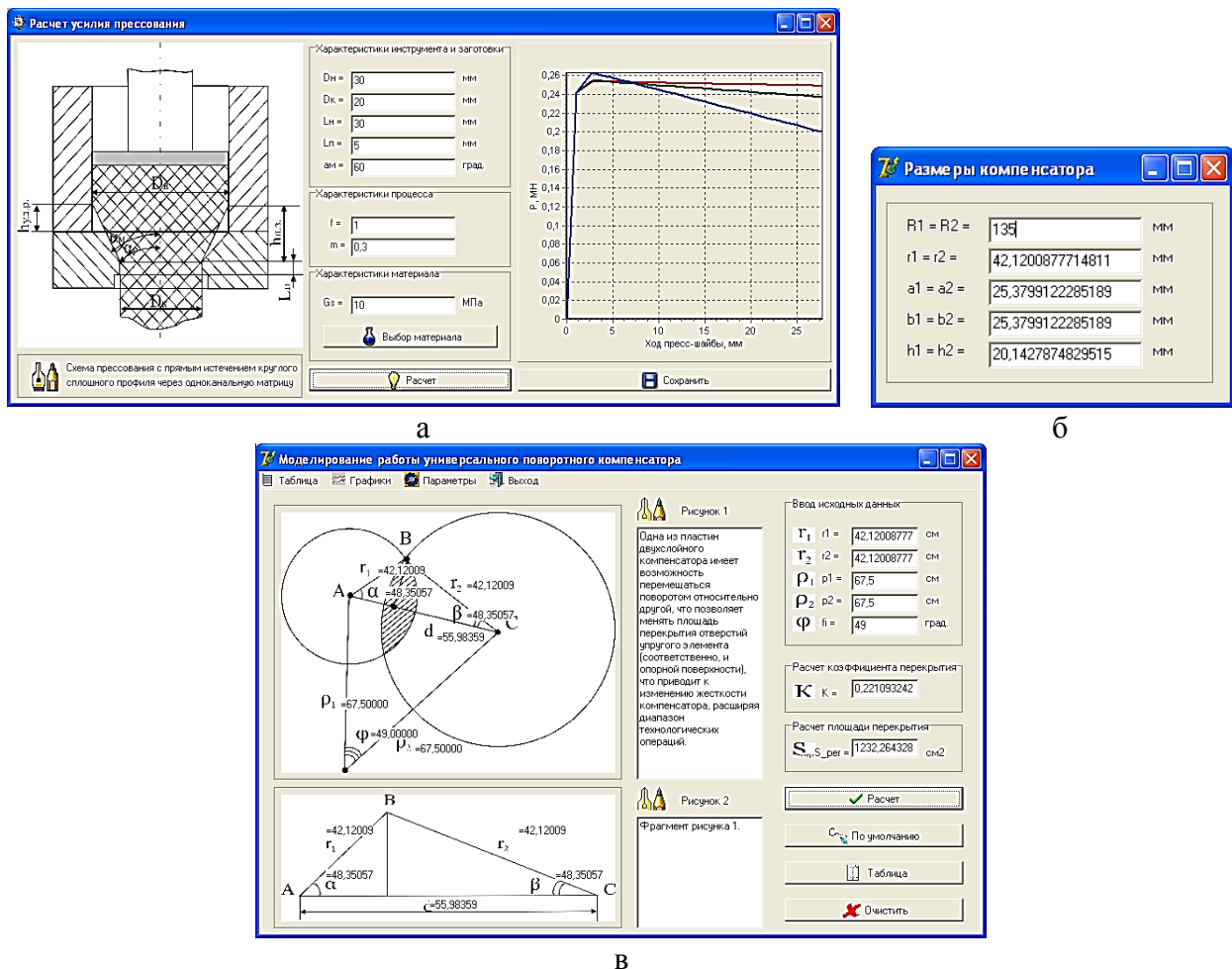


Рис. 4. Интерфейс программы:

а – расчет силы прессования; б – определение начальных размеров универсального поворотного компенсатора; в – моделирование работы универсального поворотного компенсатора

Принимали, что материал заготовки имеет значение  $\sigma_s = 18,1$  МПа (это соответствует свинцу, как материалу для лабораторных испытаний, и стали в горячем состоянии). Построены график зависимости силы прессования  $P$  от хода пресс-шайбы (рис. 4, а).

Определяли начальные размеры универсального упругого поворотного компенсатора (рис. 4, б): 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  $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 25,38$  мм, высота пластин  $h_1 = h_2 = 20,14$  мм. Установлено, что для достижения оптимальной жесткости компенсатора необходимо повернуть верхнюю упругую пластину на угол  $\varphi = 49^\circ$  (рис. 4, в).

### ВЫВОДЫ

Разработано программное обеспечение для расчета конструктивных характеристик поворотных упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» для процесса прессования профилей. Программный продукт включает в себя: а) расчет изменения силовых параметров прессования и сжатия компенсатора в зависимости от силовых режимов операции прессования; б) вычисление коэффициента формы и определение оптимальных геометрических размеров универсального поворотного упругого компенсатора; в) расчет коэффициента перекрытия и оптимального угла поворота подвижной пластины компенсатора для достижения необходимой его жесткости. Использование универсальных поворотных компенсаторов для операции прессования позволяет уменьшить упругие деформации в узлах прессового оборудования в широком диапазоне технологических нагрузок.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 537 Україна, МПК В 21 В 23/00. Компенсатор похибок повзуна пресу / Діамантопуло К. К., Засоба І. О. – Заявл. 30.06.99; опубл. 15.09.2000, Бюл. № 4.
2. Пат. 837 Україна, МПК В 21 В 23/00. Компенсатор похибок / Діамантопуло К. К., Василевський О. В. – № 99063674; заявл. 11.07.2000; опубл. 14.11.2001, Бюл. № 11.
3. Діамантопуло К. К. Компенсація несоосности системи «пресс-штамп» изношенного штампового обладнання / К. К. Діамантопуло, В. В. Кухарь, А. І. Евтеев // *Металлургические процессы и оборудование. – Донецк : ДонНТУ, 2005. – № 2. – С. 31–34.*
4. Универсальный компенсатор погрешностей направления ползуна / К. К. Діамантопуло, В. Е. Гримани, В. В. Кухарь, Д. М. Ширманов // *Тез. доклад. VIII регион. науч.-техн. конф. – Мариуполь, 2001. – Т. 3. – С. 41–42.*
5. Балалаева Е. Ю. Расчет универсальных упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» для операции вытяжки-формовки / Е. Ю. Балалаева // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 193–198.*
6. 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 Донбасской государственной машиностроительной академии: сб. науч. тр. – Краматорск, 2009. – № 1 (4Е). – С. 117–122. – Режим доступа: [http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009\\_1/nomer.htm](http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009_1/nomer.htm).*
7. Данченко В. Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, А. Н. Головки. – Днепропетровск : Системные технологии, 2002. – 448 с.
8. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с. : ил.
9. Еднерал П. П. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением / П. П. Еднерал, И. Г. Константинов. – М. : Машигиз, 1960. – 334 с.

Тузенко О. А. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ;

Балалаева Е. Ю. – ассистент ПГТУ;

Кухарь В. В. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ;

Бурко В. А. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: balalaevaeu@gmail.com; kvv\_mariupol@mail.ru.