

УДК 621.979:004.413

Тузенко О. А., Балалаева Е. Ю.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОВОРОТНОГО КОМПЕНСАТОРА С ОТВЕРСТИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ В УПРУГИХ ПЛАСТИНАХ

По мере возрастания роли машиностроения, в частности кузнечно-штамповочного производства, встает проблема соответствия качества изготавливаемых деталей установленным стандартам, а также предотвращения износа и поломок элементов прессового оборудования.

Устранение отклонений взаимного расположения деталей и узлов прессового оборудования является одной из актуальных задач для конструкторов, технологов и ремонтников в области обработки металлов давлением [1–5]. Перспективными устройствами, снижающими перекосы ползунов прессов при технологических нагрузках, являются компенсаторы на основе упругих элементов [6–9], выполненных, например, из полиуретана [10]. Однако большинство таких устройств обладает фиксированной общесредней жесткостью, которая ограничивает диапазон расчетных технологических усилий и приводит к необходимости замены компенсатора в случае изменения параметров технологических процессов.

Для решения проблемы разработана конструкция универсального компенсатора (рис. 1), основой которого служат две круглые упругие пластины 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 [11–12].

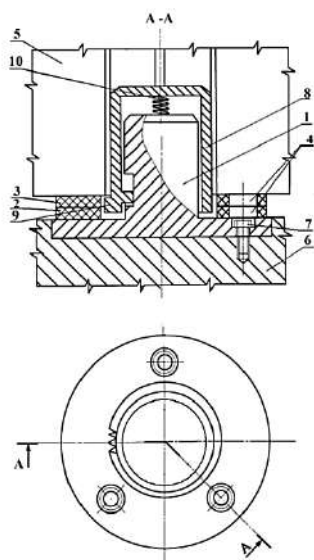


Рис. 1. Универсальный поворотный упругий компенсатор:

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

Целью работы является разработка программного обеспечения для моделирования работы универсальных поворотных упругих компенсаторов с отверстиями различной формы в упругих пластинах.

Рассматривали универсальный поворотный упругий компенсатор с радиусами верхней и нижней пластин R_1 и R_2 соответственно ($R_1 \leq R_2$), расстояниями от центра пластин до центров отверстий ρ_1 и ρ_2 , а также углом поворота верхней пластины φ (рис. 2).

Исследовали работу поворотного компенсатора для трех форм отверстий: овальной формы (радиусы отверстий верхней пластины a_1 и b_1 , нижней пластины – a_2 и b_2); круглой формы (радиус отверстий верхней и нижней пластины – r_1 и r_2); формы произвольного многоугольника. На рис. 2 приведен пример схемы перекрытия овальных отверстий.

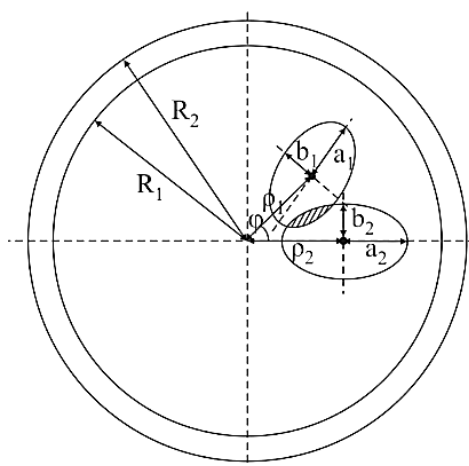


Рис. 2. Схема перекрытия отверстий овальной формы в упругих пластинах универсального поворотного компенсатора

Для отверстий овальной формы аналитическим методом была получена система уравнений для расчета точек пересечения отверстий (эллипсов):

$$\begin{cases} y_1(x) = \left(-B(x) - \sqrt{(B(x))^2 - 4 \cdot A(x) \cdot C(x)} \right) / (2 \cdot A(x)); & y_2(x) = b_2 \sqrt{1 - ((x - \rho_2)/a_2)^2}; \\ A(x) = \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi; & B(x) = -\left((2 \cos \varphi (\sin \varphi (x - \rho_1 \cdot \cos \varphi) + \rho_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi)) / b_1^2 \right) - \\ & - \left((2 \sin \varphi \cdot (\rho_1 \cdot \sin^2 \varphi - \cos \varphi (x - \rho_1 \cdot \cos \varphi))) / a_1^2 \right); \\ C(x) = \left((\sin \varphi (x - \rho_1 \cdot \cos \varphi) + \rho_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi)^2 / b_1^2 \right) + \left((\rho_1 \cdot \sin^2 \varphi - \cos \varphi (x - \rho_1 \cdot \cos \varphi))^2 / a_1^2 \right) - 1. \end{cases} \quad (1)$$

Корни уравнения из уравнения $y(x) = y_1(x) - y_2(x) = 0$. В результате получали точки пересечения эллипсов (x_A, y_A) и (x_B, y_B) .

Площадь пересечения овальных отверстий определяли как $S_{пер} = \int_{x_A}^{x_B} (y_1(x) - y_2) dx$. Коэффициент перекрытия определяли как $K_{пер} = S_{пер} / S_1$, где $S_1 = \pi \cdot a_1 \cdot b_1$.

Для отверстий круглой формы коэффициент перекрытия $K_{пер}$ определяли как:

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

где $\omega = r_2/r_1$, $A = \sin \alpha$. Угол α рассчитывали по формулам:

$$r_1 \cos \alpha + r_2 \cos \beta = d, \quad r_1 \sin \alpha = r_2 \sin \beta, \quad (3)$$

где $d = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos \varphi}$ – расстояние между центрами отверстий пластин.

Для определения площади пересечения отверстий в форме многоугольника применяли алгоритм Сазерленда-Ходжмана, который заключается в сведении задачи отсечения прямоугольником к задаче отсечения полуплоскостями. Прямоугольник представляли в виде пересечения четырех полуплоскостей, при этом поочередно отсекали части многоугольника, лежащие вне каждой полуплоскости. Затем реализовывали алгоритм, позволяющий вывести в качестве результата вершины отсеченного многоугольника, обходя исходные вершины. В результате получали последовательность координат соседних друг другу вершин n в N -угольнике без самопересечений: $\{(X_i, Y_i)\}, i=1, 2, \dots, n$. Площадь полученного N -угольника вычисляли по формуле:

$$S_{nep} = 0,5 \left| \sum_{i=1}^n (X_i + X_{i+1})(Y_i - X_{i+1}) \right|. \quad (4)$$

На основе полученной математической модели было разработано программное обеспечение для моделирования работы универсальных поворотных упругих компенсаторов с отверстиями различной формы. Программный продукт реализован на языках HTML, CSS, JavaScript в среде объектно-ориентированного программирования JetBrains WebStorm 2017 со стандартным набором библиотек. Использование веб-технологий обусловлено простотой написания кода, кроссплатформенностью и скоростью освоения пользователем нового программного продукта. Если не использовать фреймворк Electron, предназначенный для написания десктопных приложений, исходный код можно будет выполнить в любом современном веб-обозревателе на любой операционной системе.

Программа представлена тремя модулями: «Ellipse Calculator», «Circle Calculator» и «Polygon Calculator», предназначенными для расчета компенсаторов с овальными, круглыми и многоугольными отверстиями соответственно.

Входными данными для каждого модуля являются размеры отверстий, радиусы упругих пластин, а также угол поворота верхней пластины компенсатора относительно нижней (рис. 3–5). Для отверстий многоугольной формы (рис. 5) изначально необходимо задать количество вершин, после чего последовательно ввести координаты вершин каждого многоугольника.

Выходными данными являются площадь и коэффициент перекрытия отверстий. Результаты расчетов отображаются в численном виде на текущей форме и в отдельном сообщении, а также отрисовываются на графике в правой части окна, где различными цветами отображаются верхняя и нижняя пластины, отверстия в них, а также площадь перекрытия отверстий (рис. 3–5). Предусмотрена возможность сохранения результатов расчетов и полученной схемы перекрытия отверстий.

Для исследования зависимости выходных значений, например, коэффициента перекрытия отверстий, от соотношения исходных параметров компенсатора предусмотрена возможность построения различных графиков, примеры которых приведены рис. 6 и рис. 7:

- для овальных отверстий: $K_{nep}(a_1/a_2)$; $K_{nep}(b_1/b_2)$; $K_{nep}(a_1/b_1)$; $K_{nep}(a_2/b_2)$; $K_{nep}(r_1/r_2)$; $K_{nep}(\rho_1/\rho_2)$; $K_{nep}(\varphi)$;
- для круглых отверстий: $K_{nep}(r_1/r_2)$; $K_{nep}(\rho_1/\rho_2)$; $K_{nep}(\rho_1/r_1)$; $K_{nep}(\rho_2/r_2)$; $K_{nep}(\varphi)$.



Рис. 3. Окно программного модуля «Ellipse Calculator» для расчета коэффициента перекрытия отверстий овальной формы в упругих пластинах компенсатора



Рис. 4. Окно программного модуля «Circle Calculator» для расчета коэффициента перекрытия отверстий круглой формы в упругих пластинах компенсатора

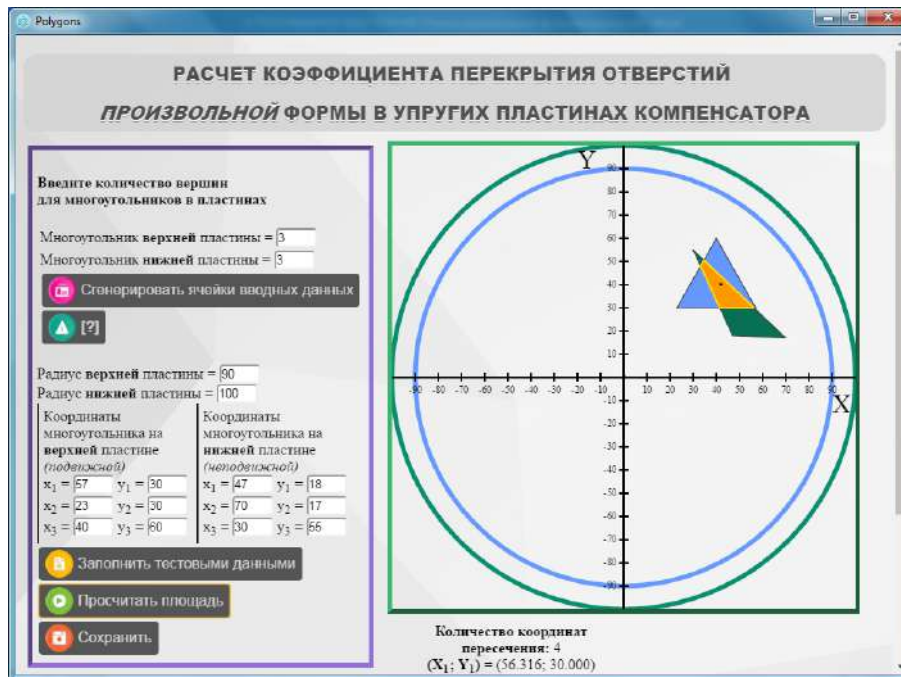


Рис. 5. Окно программного модуля «Polygon Calculator» для расчета коэффициента перекрытия отверстий произвольной формы в упругих пластинах компенсатора

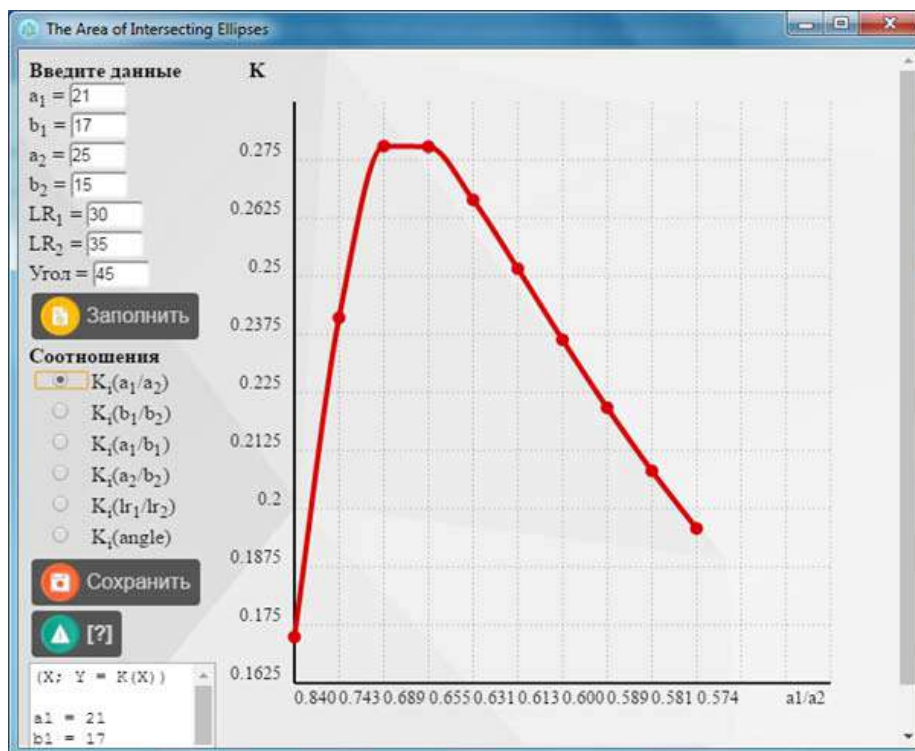


Рис. 6. График зависимости коэффициента перекрытия от соотношения больших диаметров овальных отверстий упругих пластин – $K_{пер}(a_1/a_2)$

Исходные данные для построения графиков по умолчанию переносятся с предыдущей формы расчета, однако при необходимости их можно изменить. Результаты расчета отображаются в численном виде в левом нижнем углу окна, а также в виде анимированного графика в правой части окна.

Для полученных графических зависимостей подобран вид аппроксимирующих выражений, при этом коэффициенты определяли методом перебора.

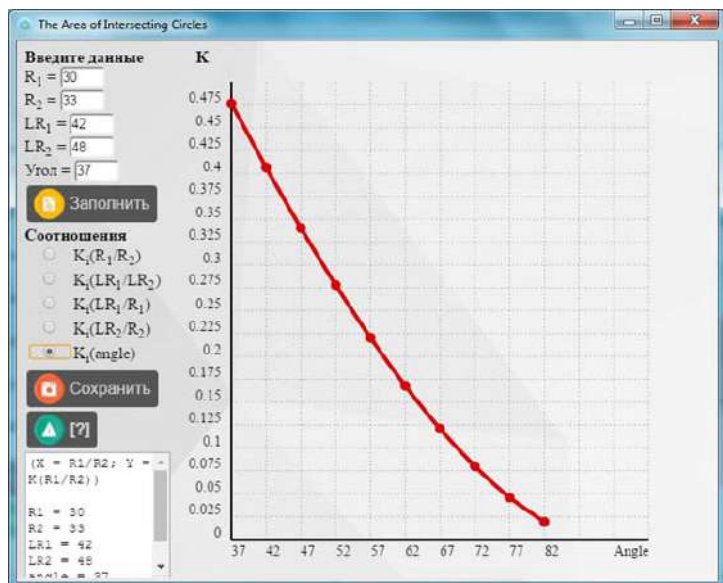


Рис. 7. График зависимости коэффициента перекрытия круглых отверстий упругих пластин от угла поворота верхней пластины – $K_{пер}(\varphi)$

Уравнение регрессии при использовании метода перебора записывается в виде:

$$Y(x) = f(k_1, k_2, k_3, k_4, x), \tag{5}$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – искомые коэффициенты.

Первоначально принимают $k_1 = Y_{max}$ и находят отклонения:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2 / n, \tag{6}$$

где n – количество пар экспериментальных данных;

y_i – заданные значения;

Y_i – расчетные значения, вычисляемые по формуле:

$$Y_i(x) = f(k_1, k_2^*, k_3^*, k_4^*, x). \tag{7}$$

Коэффициенты k_2^* , k_3^* и k_4^* , при которых отклонение Δ является минимальным, входят в первое приближение. Для более точного описания экспериментальных данных необходимо уточнение значения k_1 по формуле:

$$a_{0,i+1} = a_{0,i} \cdot f(k_2^*, k_3^*, k_4^*, x_{Y_{max}}), \tag{8}$$

где $x_{Y_{max}}$ – величина x при $Y = Y_{max}$.

С уточненным значением k_1 пересчитываем коэффициенты k_2 , k_3 и k_4 . Расчет осуществляется до тех пор, пока:

$$|k_{1i} - k_{1,i+1}| < \delta, \tag{9}$$

где δ – заданная точность.

ВЫВОДЫ

Данный метод не требует значительных вычислительных ресурсов и обладает достаточно высокой точностью, что позволяет использовать его для решения поставленных задач.

Анализ полученных графических и аналитических зависимостей показал, что коэффициент перекрытия отверстий упругих платин, а, соответственно, и жесткость компенсатора можно менять путем изменения соотношения радиусов окружностей, что определяется конструкцией компенсатора, или путем поворота одной пластины относительно другой в процессе работы компенсатора.

Таким образом, разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать коэффициент перекрытия отверстий различной формы в упругих пластинах универсального упругого компенсатора в зависимости от его геометрических размеров. Разработанное программное обеспечение можно использовать на всех современных операционных системах (таких как Windows, Mac OS, Linux) и мобильных устройствах (работающих под iOS и Android) как в качестве десктоп-приложения, так и веб-приложения. Представленный программный продукт может быть использован при проектировании и совершенствовании конструкций упругих компенсаторов, что позволит повысить точность штампованных металлоизделий за счет снижения упругих деформаций и уменьшения погрешностей направления ползуна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Geometric error measurement and compensation of machines – An update* / H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine // *CIRP Annals – Manufacturing technology*. – 2008. – Issue 57, P. 660–675.
2. *Smith D. Why Press Slide Out of Parallel Problems Affect Part Quality and Available Tonnage* / D. Smith // *Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1988*.
3. *Slide Out-of-Parallel Problems: Why they affect part quality and available tonnage* // *The Fabricator, The Fabricator's and Manufacturer's Association, International, Rockford, Illinois, April 1990*.
4. Пат. № 74203 Україна, МПК (2012.01) В 21 D 37/00. Вузол кріплення верхньої плити штампа до повзуна преса / О. Ф. Тарасов, О. Л. Максименко ; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u 201202786 ; заявл. 12.03.2012 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
5. *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.
6. 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. ; іл.
7. Пат. 11782 Україна, МПК(2006) В 21 В 23/00. Компенсатор похибок напряму переміщення повзуна преса / Диамантопуло К. К., Кухар В. В., Єрмолов Д. В. (Україна) ; заявник і патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № u200505677 ; заяв. 13.06.2005 ; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 4 с. ; іл.
8. *Balalayeva E. Researching of the Stress-Strain State of the Open-Type Press Frame Using of Elastic Compensator of Errors of "Press-Die" System* / E. Balalayeva, V. Artiukh, V. Kukhar, O. Tuzenko, V. Glazko, A. Prysiaznyi, V. Kankhva // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017. – Volume 692. – P. 220–235.
9. *Kukhar V. Calculation method and simulation of work of the ring elastic compensator for sheet-forming* / V. Kukhar, E. Balalayeva, O. Nesterov // *MATEC Web of Conferences*, 2017. – Volume 129, 01041. – P. 1–4.
10. *Artiukh V. Peculiarities of Mechanical Characteristics of Contemporary Polyurethane Elastomers* / V. Artiukh, S. Karlushin, E. Sorochan // *Procedia Engineering*, 2015. – Volume 117. – P. 933–939.
11. *Kukhar V. Calculation of Universal Elastic Compensator Applied to the Pressing-Extrusion Operations* / V. Kukhar, E. Balalayeva, O. Tuzenko, V. Burko // *Multidisciplinary Journal of Research in Engineering and Technology*, 2015. – Issue July, 2(3). – P. 593–604.
12. *Balalayeva E. The Computer-Aided Method of Calculation of Universal Elastic Rotary Compensator for the "Press-and-Die" System Errors of Crank Press for Drawing-Forming Operations* / E. Balalayeva, V. Kukhar, O. Hrushko // *HCTL Open Science and Technology Letters (STL)*, 2014, August.