

УДК 539.89: 621.7.043: 621.77: 621.777.01

Периг А. В.
Матвеев И. А.
Паламарчук В. А.
Подлесный С. В.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВНЕШНЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШТАМПА НА КИНЕМАТИКУ РАВНОКАНАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИИ

В настоящее время процессы углового прессования с равноканальным пластическим течением заготовок, также известные как процессы равноканального углового прессования (РКУП), находят применение для получения ультрамелкозернистых материалов [1–2]. Дальнейшее развитие процессов РКУП связано с повышением коэффициента использования материала, уменьшением краевого эффекта при прессовании заготовок и снижением макроскопической ротации в переходной зоне угловых штампов [3–7]. Одним из способов решения указанных технологических задач является управление геометрической формой контактной поверхности штампа, расположенной в зоне пересечения входного и выходного каналов углового штампа [7–10]. В ранее опубликованных работах главный акцент делался на следующие типы геометрии штампов для РКУП в зависимости от геометрической формы внешней контактной поверхности: штампы Segal-геометрии [1–2], штампы Iwahashi-геометрии [4–5], штампы Luis Régez-геометрии [6, 8–10], штампы с параллельными скосами [11]. Классическая геометрия Iwahashi-штампа реализуется выполнением внешней переходной стенки в зоне сопряжения каналов в виде дуги окружности [4–5], тогда как пластическое течение материала через штампы более сложной геометрии по-прежнему остается малоизученным. Так, в известных работах [1–11] остались малоизученными формы внешних контактных поверхностей, определяемых такими кривыми второго порядка, как дуги гипербол, парабол (рис. 1, а), а также дуги эллипсов (рис. 1, б), что обосновывает актуальность настоящего исследования.

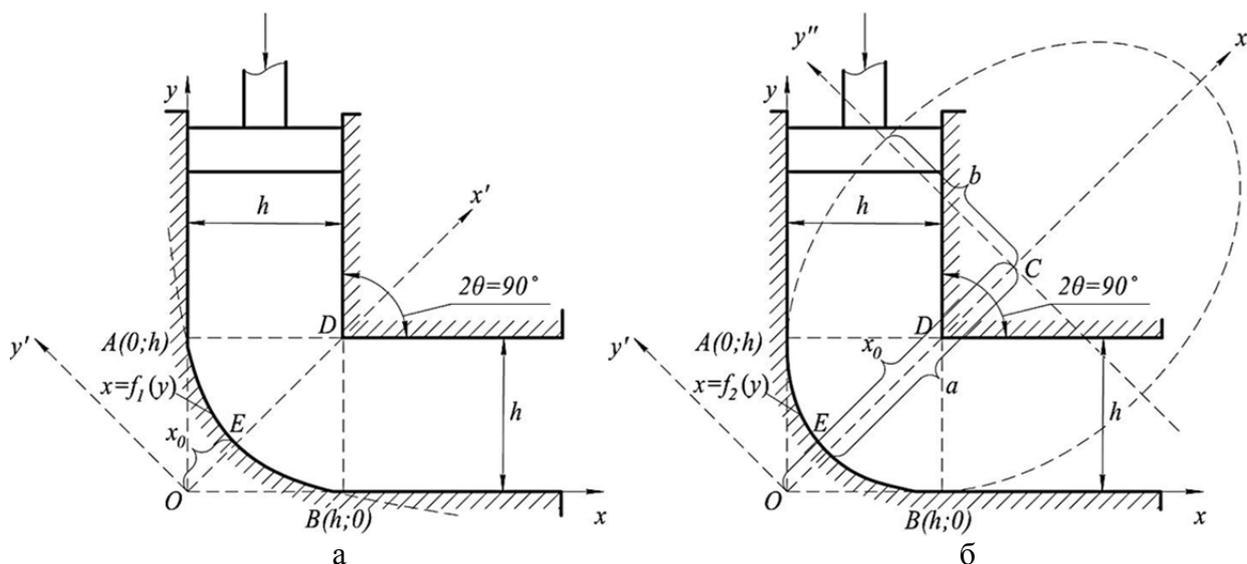


Рис. 1. Схемы обобщенных угловых штампов с варьируемыми внешними контактными поверхностями AB в виде варьируемых семейств гипербол и парабол $x = f_1(y)$ (а), а также в виде варьируемых семейств эллипсов $x = f_2(y)$ (б)

Задачи о равноканальном пластическом течении деформируемых материалов через обобщенные угловые штампы на рис. 1 отличаются значительными геометрическими сложностями, которые затрудняют применение таких классических методов теории пластичности, как метод полей линий скольжения, из-за нарушений условий линейности задач, на которых

основаны существующие способы построения линий скольжения [12–14]. Следовательно, анализ пластического течения материалов при осуществлении РКУП через рассматриваемые штампы (рис. 1) требует применения вариационных методов теории обработки металлов давлением [15–16]. В тоже время, стремительное развитие современных CAD-CAE систем для численного мультифизического моделирования технологических процессов обработки материалов давлением позволяет исследователю получать первое приближение решаемой задачи посредством применения таких САПР-систем, как Abaqus, Ansys, LS-Dyna, Deform, QForm и др. На первичном этапе математического моделирования в имитационной постановке приобретает большую важность корректная подготовка исходной геометрии штамповой оснастки и деформируемой заготовки в виде соответствующих входных файлов для систем конечно-элементного моделирования. При этом геометрический анализ исходной и деформированной заготовки на этапах пре- и постпроцессинга приводит к целому ряду задач начертательной, аналитической и дифференциальной геометрии. Отметим, что варьирование контура AB , определяющего форму внешней контактной поверхности для обобщенного штампа Iwahashi, в рамках применения CAD-CAE систем, тесно связано с прикладными задачами аналитической геометрии, к которым относится построение уравнений семейств кривых второго порядка, проходящих через две фиксированные точки, симметрично расположенные относительно биссектрисы угла $2\theta = 90^\circ$ (рис. 1). Дальнейшее совершенствование штамповой оснастки для реализации процессов углового прессования с равноканальным пластическим течением деформируемых материалов должно решать технологические задачи, связанные с достижением большей интенсивности деформаций при наименьшей неравномерности их распределения по длине заготовки за каждый проход деформирования. Решение поставленных задач требует рассмотрения геометрических форм штампов, отличных от известных пресс-форм Segal, Iwahashi, Luis Pérez, и обеспечивающих новую кинематику пластического течения заготовки.

Целью настоящей работы является нахождение среди варьируемых семейств кривых второго порядка такой формы внешней контактной поверхности углового штампа, при которой обеспечивается получение наибольшей интенсивности накопленных деформаций наряду с достижением минимальной неравномерности их распределения.

Рассмотрим задачу равноканального пластического течения металла через угловой штамп с шириной h входного и выходного каналов, причем форма внешней стенки AB углового штампа определяется дугами гипербол, парабол или эллипсов, проходящих через точки $A(0; h)$ и $B(h; 0)$, симметрично расположенные относительно наклонной оси Ox' – биссектрисы первого квадранта системы координат xOy (рис. 1). Введем новую систему координат $x'Oy'$, которая повернута относительно системы xOy на угол 45° .

В новой системе $x'Oy'$ уравнение семейства парабол $x = f_l(y)$ будет иметь вид (рис. 1, а):

$$x' = x_0 + k \cdot (y')^2. \quad (1)$$

Связь между старой xOy и новой $x'Oy'$ системами координат имеет вид:

$$x = x' \cdot (\sqrt{2}/2) - y' \cdot (\sqrt{2}/2); \quad y = x' \cdot (\sqrt{2}/2) + y' \cdot (\sqrt{2}/2) \quad (2)$$

$$x' = (\sqrt{2}/2) \cdot (x + y); \quad y' = (\sqrt{2}/2) \cdot (y - x). \quad (3)$$

Подставим (3) в уравнение (1) и получим уравнение параболы в системе xOy :

$$k(y - x)^2 + 2 \cdot x_0 - \sqrt{2} \cdot (x + y) = 0. \quad (4)$$

Подставим в уравнение (4) координаты точек A и B , через которые проходят параболы, и запишем коэффициент k через параметры h и x_0 :

$$k = (\sqrt{2} \cdot h - 2 \cdot x_0) / (h^2). \quad (5)$$

Для парабол геометрические ограничения для x_0 установим в виде (рис. 1, а):

$$0,39 \cdot h \leq x_0 < 0,707 \cdot h. \quad (6)$$

В новой системе $x'Oy'$ уравнение семейства гипербол $x = f_1(y)$, записанное в виде неявно заданной функции, будет иметь вид (рис. 1, а):

$$\left((x')^2 / a^2 \right) - \left((y')^2 / b^2 \right) = 1. \quad (7)$$

Подставим (3) в уравнение (7) и получим уравнение гиперболы в системе xOy :

$$\left((x + y)^2 / a^2 \right) - \left((y - x)^2 / b^2 \right) = 2, \quad (8)$$

причем

$$x_0 = a. \quad (9)$$

Подставляя в уравнение (8) координаты точек A и B , через которые должна проходить гипербола, находим значение коэффициента b через параметры h и x_0 :

$$b = (x_0 \cdot h) / \left(\sqrt{h^2 - 2 \cdot x_0} \right). \quad (10)$$

Для гипербол геометрические ограничения для x_0 установим в виде (рис. 1, а):

$$0 < x_0 < 0,707 \cdot h. \quad (11)$$

В новой системе $x''Cy''$ уравнение семейства эллипсов $x = f_2(y)$, записанное в виде неявно заданной функции, будет иметь вид (рис. 1, б):

$$(x'')^2 / a^2 + (y'')^2 / b^2 = 1. \quad (12)$$

Связь между старой xOy и новой $x''Cy''$ системами координат имеет вид:

$$x = (\sqrt{2}/2) \cdot (x'' + x_0) - y' \cdot (\sqrt{2}/2); \quad y = (\sqrt{2}/2) \cdot (x'' + x_0) - y' \cdot (\sqrt{2}/2); \quad (13)$$

$$x'' = (\sqrt{2}/2) \cdot (x + y) - x_0; \quad y' = (\sqrt{2}/2) \cdot (y - x). \quad (14)$$

Подставим (14) в уравнение (12) и получим уравнение эллипса в системе xOy с учетом параллельного переноса на величину x_0 вдоль оси Ox' :

$$\left(\left((x + y) / \sqrt{2} \right) - x_0 \right)^2 / a^2 + (y - x)^2 / 2 \cdot b^2 = 1. \quad (15)$$

Подставляя в уравнение (15) координаты точек A и B , через которые должен проходить эллипс, находим значение коэффициента b через параметры h и x_0 :

$$b = h / \sqrt{2 \cdot \left(1 - \left(\left((h / \sqrt{2}) - x_0 \right)^2 / a^2 \right) \right)}. \quad (16)$$

Для эллипсов геометрические ограничения для $(x_0 - a)$ установим в виде (рис. 1 б):

$$0 < x_0 - a < 0,707 \cdot h. \quad (17)$$

Полученные соотношения (4)–(6), (8)–(11) и (15)–(17) были использованы для построения 30 входных геометрических файлов со схемами обобщенных угловых штампов Iwahashi с геометрически допустимыми формами внешних контактных поверхностей, ограниченных возможными семействами из 10 парабол, 10 гипербол и 10 эллипсов соответственно. Каждый из угловых штампов на рис. 1 характеризуется углом $2\theta = 90^\circ$ между входным и выходным каналами, шириной каналов $a = 35,4$ мм, а также наличием варьируемой внешней стенки AB в виде дуги параболы, гиперболы (рис. 1, а) либо дуги эллипса (рис. 1, б). При этом все варьируемые семейства кривых второго порядка (4), (8) и (14) расположены в первом квадранте системы координат xOy (рис. 1). Для учёта влияния формы кривых второго порядка (4), (8) и (15), ограничивающих внешние контуры контактных поверхностей штампов (рис. 1), на величину и неравномерность распределения деформаций по длине обрабатываемой заготовки,

для каждой из кривых выполнялось конечно-элементное моделирование (МКЭ моделирование) процессов РКУП в среде QForm-2D [17] (лицензия ДГМА № U1221). Рассматривается пластическое течение заготовок из меди М1 длиной $L = 550$ мм без учета трения между заготовками и штампом, $m = 0$. Сопротивление деформации для образцов из отожженной меди М1 $\sigma = 397,3\varepsilon^{0,2}$ (МПа) было определено экспериментально посредством механических испытаний на растяжение, а для остальных механических параметров медных заготовок принимались следующие табличные значения: плотность $\rho = 8960$ кг/м³, температура плавления $t_{пл} = 1083$ °С, модуль упругости $E = 110$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Т. о. каждый из процессов РКУП медных заготовок через 30 моделируемых штампов характеризуется определенной характеристикой формы e кривой второго порядка, ограничивающей зону контактной поверхности углового штампа (рис. 1). При этом, для семейства парабол (4)–(6) $e = x_0/h$ (рис. 1, а), для семейства гипербол (8)–(11) $e = a/h$ (рис. 1, а, с учётом (9)), а для семейства эллипсов (15)–(17) $e = (x_0 - a)/h$ (рис. 1, б). В рамках принятых обозначений, диапазон характеристик формы e для парабол $0,367 \leq e \leq 0,558$ и эллипсов $0,406 \leq e \leq 0,580$ достаточно узок, чтобы обеспечить требуемые условия деформирования. При этом в случае выполнения внешней стенки AB в виде гипербол, имеет место более широкий диапазон изменения параметра e , который составляет $0,141 \leq e \leq 0,565$. Т. о. применение гипербол (8) по сравнению с параболами (4) и эллипсами (15) позволяет осуществлять более широкое варьирование геометрических параметров внешней контактной поверхности AB углового штампа.

В результате проведенных 30 расчетов были получены 30 конечно-элементных эпюр для распределения интенсивности деформаций по контуру деформируемой заготовки. Для вычисления усредненной интенсивности логарифмических деформаций (рис. 2, а) для каждой расчетной эпюры воспользуемся аналогией между средней интенсивностью деформаций $\langle e_i \rangle$ по плоскому контуру заготовки и координатой центра тяжести плоской фигуры:

$$\langle e_i \rangle = \sum_{k=1}^n \Delta S_k \cdot (e_i)_k / S, \quad (18)$$

где ΔS_k – площадь криволинейной зоны между соседними изолиниями на МКЭ эпюре интенсивности логарифмических деформаций, $(e_i)_k$ – средняя интенсивность логарифмических деформаций в криволинейной зоне ΔS_k между соседними изолиниями, а S – площадь сечения всей модели заготовки. В формуле (18) площади ΔS_k и S определяются в системе AutoCAD Student с использованием команд «Region» и «Massprop».

Значения кривизны варьируемых парабол (k_{par}), гипербол (k_{hyp}) и эллипсов (k_{ell}) в их вершинах E , лежащих на биссектрисе OD угла $\angle AOB$ (рис. 1), определяются как:

$$k_{par} = 2 \cdot (\sqrt{2} \cdot h - 2 \cdot x_0) / h^2; \quad k_{hyp} = a / b^2; \quad k_{ell} = b / a^2. \quad (19)$$

Посредством применения соотношения (18) к анализу расчетных эпюр, получены численные зависимости для усредненной интенсивности $\langle e_i \rangle$ (рис. 2, а) и неравномерности деформаций $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ (рис. 2, б) от характеристики формы e возможных семейств парабол (—, ★), гипербол (—, ○) и эллипсов (—■—, □), ограничивающих контуры внешних контактных поверхностей при пластическом течении заготовок из меди М1 (рис. 2).

В результате численного моделирования установлено, что для одного и того же значения характеристики формы e наибольшая интенсивность деформаций $\langle e_i \rangle$ на рис. 2, а соответствует случаю выполнения внешней стенки AB углового штампа в виде дуги гиперболы (—), причем для дуг парабол (—) и эллипсов (—■—) имеет место последовательное снижение значения $\langle e_i \rangle$. Также установлено, что для фиксированного значения характеристики формы e наименьшая неравномерность деформаций $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ на рис. 2, б соответствует выполнению стенки AB в виде дуги гиперболы (—), причем для дуг парабол (—) и эллипсов (—■—) неравномерность деформаций примерно одинакова. Также примем во внимание, что гиперболические дуги (—) могут быть построены в более широком диапазоне изменения характеристики формы e .

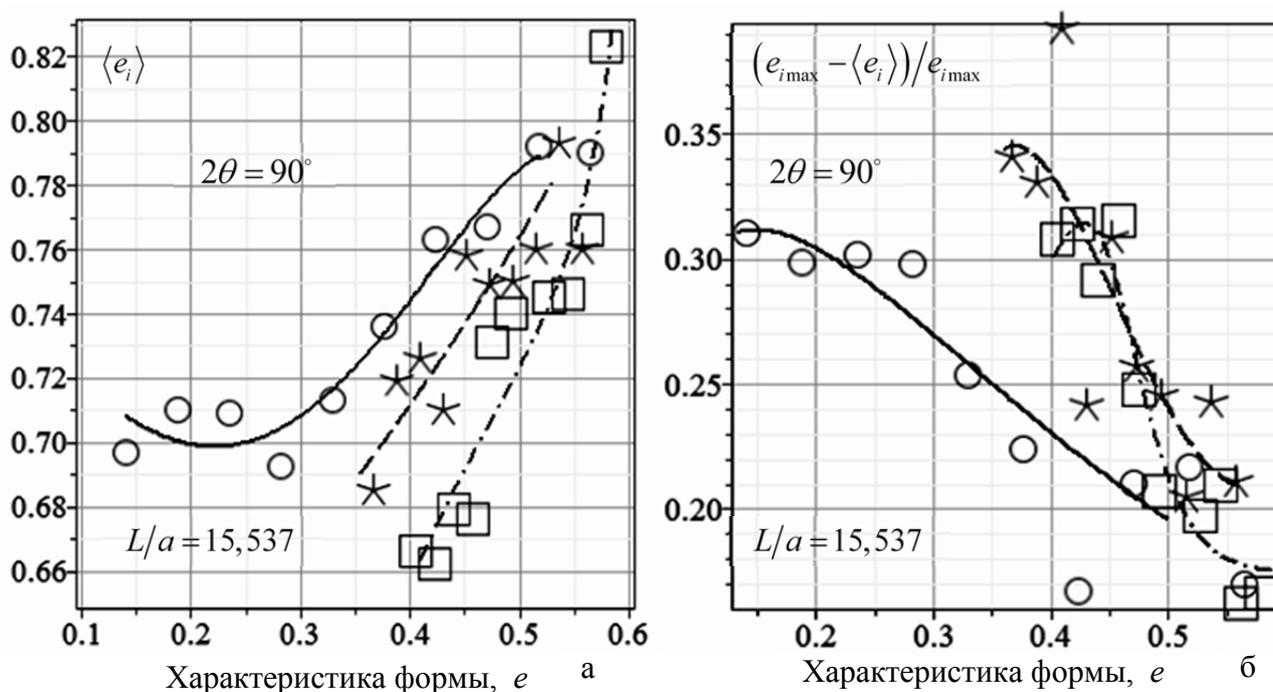


Рис. 2. Характер влияния характеристики формы e исследуемых кривых второго порядка на усредненную интенсивность $\langle e_i \rangle$ (а) и неравномерность $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ (б) деформаций при прессовании заготовок в угловых штампах с варьируемыми внешними стенками в виде семейств парабол (---, ★), гипербол (—, ○) и эллипсов (---, □)

Посредством применения формулы (19) установлено, что в диапазоне $0,367 \leq e \leq 0,580$ значения кривизны дуг парабол и эллипсов изменяются незначительно и не оказывают существенного влияния на исследуемые параметры интенсивности $\langle e_i \rangle$ и неравномерности $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ деформаций.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод, что среди возможных семейств кривых второго порядка одновременное достижение наибольшего значения интенсивности $\langle e_i \rangle$ при минимальной неравномерности $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ деформаций обеспечивается выполнением внешней контактной поверхности AB углового штампа в виде дуги гиперболы.

ВЫВОДЫ

С использованием формул аналитической геометрии получены соотношения, определяющие форму криволинейной внешней контактной поверхности углового штампа в зоне пересечения каналов среди таких варьируемых семейств кривых второго порядка, как дуги парабол, гипербол и эллипсов. В качестве параметра, характеризующего форму криволинейной внешней контактной поверхности углового штампа, выбрана характеристика формы e , диапазоны которой определяются из условия расположения варьируемой дуги внешней контактной поверхности в первом квадранте и составляют: $0,367 \leq e \leq 0,558$ для парабол, $0,141 \leq e \leq 0,565$ для гипербол и $0,406 \leq e \leq 0,580$ для эллипсов. Наиболее широкому из указанных диапазонов соответствует варьируемая дуга гиперболы.

Теоретически с использованием двумерного конечно-элементного моделирования выполнен учет влияния вида семейств варьируемых кривых второго порядка, определяющих форму внешней контактной поверхности штампа, на величину неравномерности деформаций при РКУП, что позволяет расширить представления о характере влияния характеристики формы e криволинейной внешней контактной поверхности углового штампа на энергосиловые параметры равноканального пластического течения. Полученные расчетные результаты позволяют рекомендовать выполнение внешней контактной поверхности углового штампа в виде дуги гиперболы, что обеспечивает достижение высоких интенсивностей $0,692 \dots 0,792$ при низких неравномерностях деформаций $0,167 \dots 0,310$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов / Р. З. Валиев, Г. И. Рааб, М. Ю. Мурашкин, Д. В. Гундеров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 11. – С. 5–12.
2. Маркушев М. В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов / М. В. Маркушев // Письма о материалах. – 2011. – Т. 1. – № 1 – С. 36–42.
3. Русин Н. М. Влияние маршрутов РКВП на особенности «концевого эффекта» / Н. М. Русин // Физика металлов и металловедение. – 2006. – Т. 102. – № 2. – С. 242–249.
4. Численное математическое моделирование основных показателей качества при равноканальном угловом прессовании на основе решения уравнения переноса вихря / А. В. Периг, Н. Н. Голоденко, А. М. Лаптев, И. И. Бойко, Д. Ю. Михеенко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1 (22) – С. 70–76.
5. Периг А. В. Экспериментально-теоретический анализ основных показателей качества при равноканальном угловом прессовании / А. В. Периг, А. М. Лаптев, А. В. Тышкевич [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 2 – С. 14–21.
6. Конечно-элементное моделирование краевого эффекта в процессе равноканального углового прессования / А. В. Периг, В. А. Паламарчук, Я. Ю. Ткаченко, Д. Ю. Михеенко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28). – С. 16–22.
7. Утяшев Ф. З. Влияние масштабного фактора на измельчение зерен в металлах при интенсивной пластической деформации // Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 11. – С. 13–20.
8. Luis Pérez C. J. Study of the ECAE process by the upper bound method considering the correct die design / C. J. Luis Pérez, R. Luri // Mechanics of Materials. – 2008. – Vol. 40. – N 8. – Pp. 617–628.
9. Evolution of damage in AA-5083 processed by equal channel angular extrusion using different die geometries / R. Luri, C. J. Luis Pérez, D. Salcedo, I. Puertas, J. León, I. Pérez, J. P. Fuertes // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – N 1. – Pp. 48–56.
10. Upper-bound sensitivity analysis of the ECAE process / N. Medeiros, L. P. Moreira, J. D. Bressan, J. F. C. Lins et al. // Materials Science and Engineering : A. – 2010. – Vol. 527. – N 12. – Pp. 2831–2844.
11. Численное моделирование вязкого течения материала при равноканальном угловом прессовании через штамп с параллельными скосами / А. В. Периг, С. В. Подлесный, Н. Н. Голоденко, И. И. Бойко, А. А. Ситник // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 23–29.
12. Segal V. M. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation / V. M. Segal // Materials Science and Engineering A. – 1999. – Vol. 271. – Pp. 322–333.
13. Segal V. M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion / V. M. Segal // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. 345. – Pp. 36–46.
14. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории процессов обработки металлов давлением [Текст] : монография / В. Ф. Потапкин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 158 с.
15. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / Тарновский И. Я., Поздеев А. А., Ганаго О. А., Колмогоров В. Л., Трубин В. Н., Вайсбург Р. А., Тарновский В. И. – М. : Металлургиздат, 1963. – 672 с.
16. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов [Текст] : монография / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – Краматорск : ДГМА, 2009. – 268 с. : ил.
17. Белокуров О. А. Применение программы моделирования процессов ОМД QForm для обучения и исследовательской работы в университетах / О. А. Белокуров, Н. В. Биба, Ю. А. Гладков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 9–14.

Периг А. В. – канд. техн. наук, ассистент кафедры ТМ ДГМА;

Матвеев И. А. – студент ДГМА;

Паламарчук В. А. – канд. техн. наук, доц. кафедры ВМ ДГМА;

Подлесный С. В. – канд. техн. наук, доц. кафедры ТМ ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: olexander.perig@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.02.2012 г.