

УДК 621.777.01: 53.072.22

Периг А. В.
Лаптев А. М.
Тышкевич А. В.
Бондаренко Е. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ: ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ ЖЕСТКИХ БЛОКОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДОМ КОЛЬЦЕВЫХ СЕТОК

Равноканальное угловое прессование (РКУП) является современной технологией обработки материалов давлением, позволяющей получать мелкозернистые металлы, сплавы, полимеры, композиты и порошковые полуфабрикаты с повышенными показателями усталостной прочности при сохранении высокой удельной прочности и технологической пластичности в области эксплуатационных температур для деталей авиационной техники, оборудования химической промышленности, медицинских имплантантов, несущих конструкций травматологических аппаратов и т. д. [1]. Процесс РКУП по Сегалу В. М. реализуется накоплением пластической деформации в обрабатываемом материале посредством многократного деформирования смазанной заготовки в штампе с двумя пересекающимися каналами одинакового поперечного сечения при сохранении её первоначальной формы и размеров [2].

В то же время промышленное применение технологии РКУП требует детального исследования как деформированного состояния обрабатываемых заготовок, так и геометрических особенностей пластического течения материала в угловом штампе, определяющих накопленную пластическую деформацию образца. Оценки геометрии застойной зоны и её влияния на неоднородность деформации выполнены в работах Altan B. S. и др. [3] и Eivani A. R. и др. [4], где показано увеличение размеров застойной зоны с возрастанием фактора трения, а сама застойная зона описывается криволинейным равнобедренным треугольником, большая сторона которого представляющей собой дугу окружности. Предложенное моделирование застойной зоны в виде криволинейного треугольника основывается на кинематической гипотезе, что в веерообразной зоне очага пластической деформации все частицы материала движутся с постоянными линейными скоростями вдоль дуг концентрических окружностей с общим центром [3–4]. Вместе с тем это не вполне согласуется с нашими собственными исследованиями пластического течения материалов при РКУП, показывающими, что застойная зона имеет более сложную геометрию [5]. Кроме того, гипотеза Бейгельзимера Я. Е. [6] о существовании аналогии между пластическим течением поликристаллов при РКУП с турбулентным течением жидкостей [6], не вполне соответствует классической теории пластичности и нуждается в дополнительных экспериментальных исследованиях, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Целью работы является анализ пластического течения материала при РКУП с учетом более сложной геометрии застойной зоны, а также экспериментальное исследование наличия зон монотонного и турбулентного течения материала на разных этапах пластического деформирования.

В соответствии с методом верхней оценки следует задать пробное поле скоростей, которое может быть непрерывным, разрывным или смешанным. В работе использовано разрывное поле скоростей. В зоне очага пластической деформации плоская модель заготовки разбивается на пять жестких треугольных блоков и рассматривается процесс пластической деформации при РКУП как результат взаимного перемещения жестких треугольных блоков 1, 2, 3 и 4, изображенных на рис. 1, а.

Исследуется образование симметричной застойной зоны *CEDF* в виде жесткого блока 5, который опирается на внешний угол пресс-формы и характеризуется двумя независимыми параметрами $h = a \cdot x$ и $H = a \cdot y$, где a – ширина каналов пресс-формы, x – относительная высота перетяжки, а y – относительная высота застойной зоны как во входном, так и в выходном

каналов. Следует отметить, что допущение о формировании асимметричной застойной зоны является совершенно неприемлемым, поскольку нарушает положение о несжимаемости материала при РКУП.

Считается, что процесс РКУП осуществляется при отсутствии противодействия, а постоянное трение между заготовкой и стенками пресс-формы не зависит от нормального давления и действует на участках l_{AC} и l_{DB} . Напряжение трения τ_f определяется в соответствии с законом Зибеля $\tau_f = 2mk$, где $m \in [0; 0,5]$ – фактор трения, k – пластическая постоянная – максимальное касательное напряжение для жесткопластического неупрочняемого материала заготовки с пределом текучести σ_s , $k = \sigma_s / \sqrt{3}$ для плоской деформации.

Соответствующий годограф скоростей перемещений заданных нами жестких блоков приведен рядом с расчетной схемой процесса на рис. 1, б.

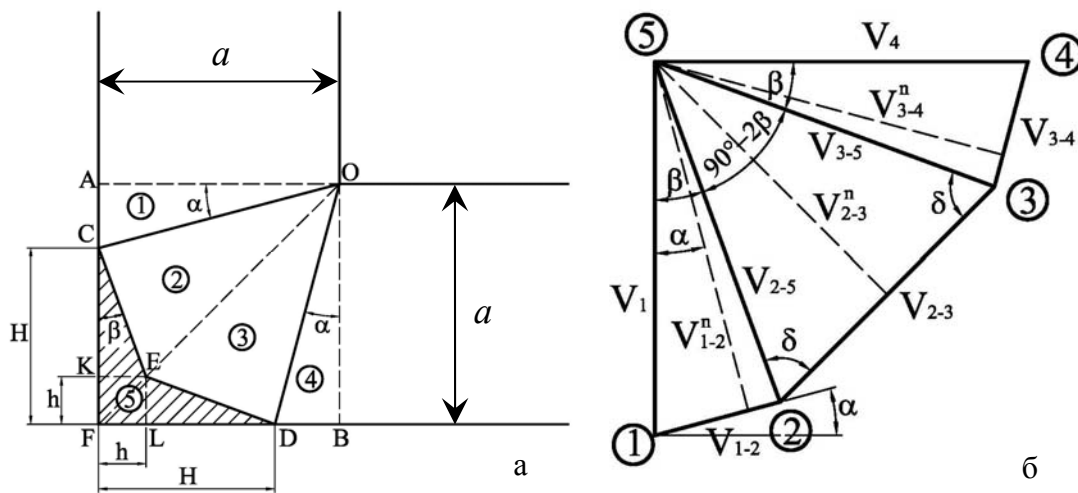


Рис. 1. Схема разбиения на жесткие блоки при наличии трения (а) и соответствующий годограф скоростей (б)

Определим давление прессования p на линии AO .

Для неупрочняемого материала при заданном разбиении на жесткие блоки уравнение баланса мощностей внешних и внутренних сил имеет вид:

$$paV_1 = k(l_{1-2}V_{1-2} + l_{2-3}V_{2-3} + l_{3-4}V_{3-4} + l_{2-5}V_{2-5} + l_{3-5}V_{3-5}) + 2mk(l_{AC} + l_{DB})V_1, \quad (1)$$

где l_{i-j} – длины общих границ блоков i и j ; $[V_{i-j}]$ – скорости относительного скольжения этих блоков; V_1 – скорость материала как во входном, так и в выходном каналах пресс-формы.

Запишем все линейные размеры в формуле (1) через x и y , а скорости через V_1 . После алгебраических преобразований из (1) получаем следующее соотношение для относительного давления прессования:

$$p/2k = \left((4x^2 + (1+x)y^2 - 5xy + y) / (y \cdot (1-x)) \right) + 2m(1-y), \quad (2)$$

где $x = h/a$ и $y = H/a$.

В то же время в процессе РКУП, который разработан как технология измельчения зерен материала, особенно важной является оценка результирующей пластической деформации. В соответствии с представленной схемой (рис. 1, а), суммарная деформация сдвига γ состоит из деформаций сдвига на линиях разрыва скоростей CO , EO и DO , т. е.:

$$\gamma = \gamma_{1-2} + \gamma_{2-3} + \gamma_{3-4}, \quad (3)$$

где $\gamma_{i-j} = [V_{i-j}]/V_{i-j}^n$, причем V_{i-j}^n – составляющая вектора скорости перемещения на линии разрыва скоростей l_{ij} , перпендикулярная к этой линии разрыва. Используя годограф на рис. 1, б, получим следующее соотношение для суммарного сдвига:

$$\gamma = \left(2x \left(1 + (1-y)^2 \right) / (y(1-x)) \right) + (2(y-2x)/y). \quad (4)$$

В соответствии с методом верхней оценки, наилучшее приближение решения соответствует минимальному значению $p/2k$ в формуле (2). Исследование (2) на экстремум сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} \partial(p/2k)/\partial x = 0, \\ \partial(p/2k)/\partial y = 0, \end{cases} \quad (5)$$

откуда получаем следующую алгебраическую систему уравнений:

$$\begin{cases} y^2 - 2x^2 + 4x - 2y = 0, \\ y^2 (x(1+2m) + (1-2m)) - 4x^2 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) решалась численно при фиксированных значениях фактора трения m .

Сопоставим полученные методом жестких блоков результаты для относительного давления прессования (2), (6) и суммарной деформации сдвига (4), (6) с решениями Сегаля В. М. [2], полученными методом полей линий скольжения для относительного давления прессования:

$$p/2k = [\cot \eta + 2(\eta - \theta)] + m / [\sin \eta \cdot (\sin \eta + \cos \eta)], \quad (7)$$

где $\eta = \pi/2 - 1/2 \cdot \arccos(2m)$ и суммарной деформации сдвига.

$$\gamma = 2 \cdot \cot \eta + 2 \cdot (\eta - \theta) \quad (8)$$

при $\theta = \pi/4$. Результаты сравнения приведены на рис. 2 и в табл. 1, где δ – это относительное расхождение результатов расчета.

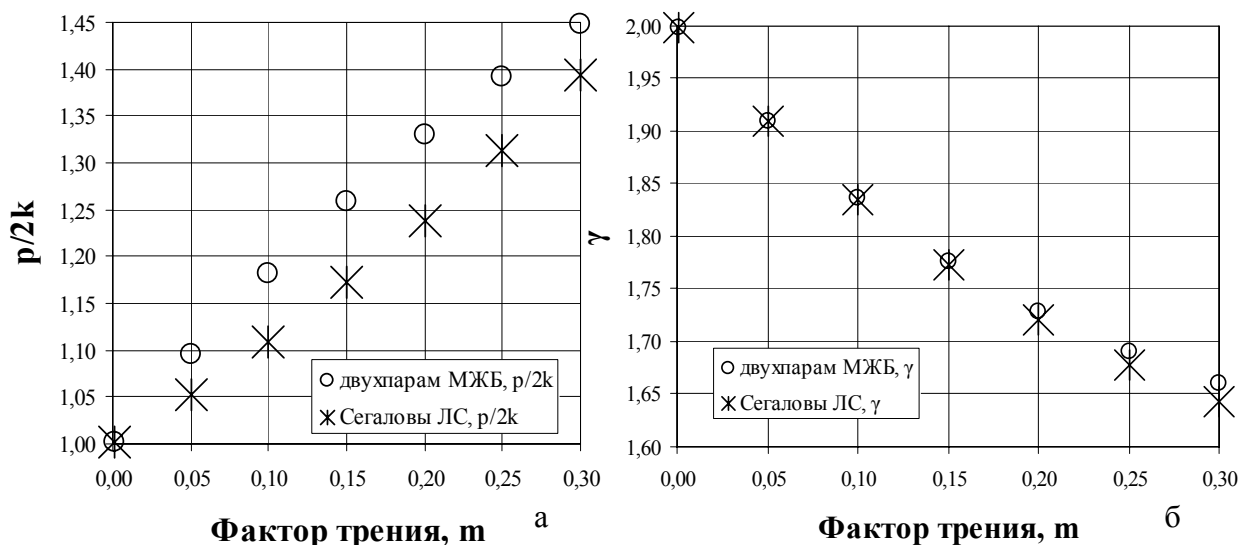


Рис. 2. Зависимости относительного давления прессования (а) и суммарной угловой деформации (б) от фактора трения, полученные двухпараметрическим методом жестких блоков (двухпарам. МЖБ) и методом линий скольжения (Сегаловы ЛС)

Также выполним сравнение полученных результатов с нашим однопараметрическим решением данной задачи [7]:

$$p/2k = 1 + \left(x^2 / (2 - x) \right) + 2m \cdot (1 - x), \quad (9)$$

где $x = 2 - \left(2 / \sqrt{1 + 2m} \right)$.

Таблица 1

Сопоставление результатов теоретического анализа

	Сегаловы ЛС	Однопарам. МЖБ	Двухпарам. МЖБ
Сегаловы ЛС		$\delta(p/2k) = 7,51\%$	$\delta(p/2k) = 7,0\%$
Однопарам. МЖБ	$\delta(\gamma) = 2,95\%$		$\delta(p/2k) = 0,76\%$
Двухпарам. МЖБ	$\delta(\gamma) = 1,0\%$	$\delta(\gamma) = 1,92\%$	

Результаты сопоставления одно- и двухпараметрических решений представлены в табл. 1 и на рис. 3, откуда следует, что предложенный двухпараметрический подход дает более низкую оценку, чем однопараметрический [7].

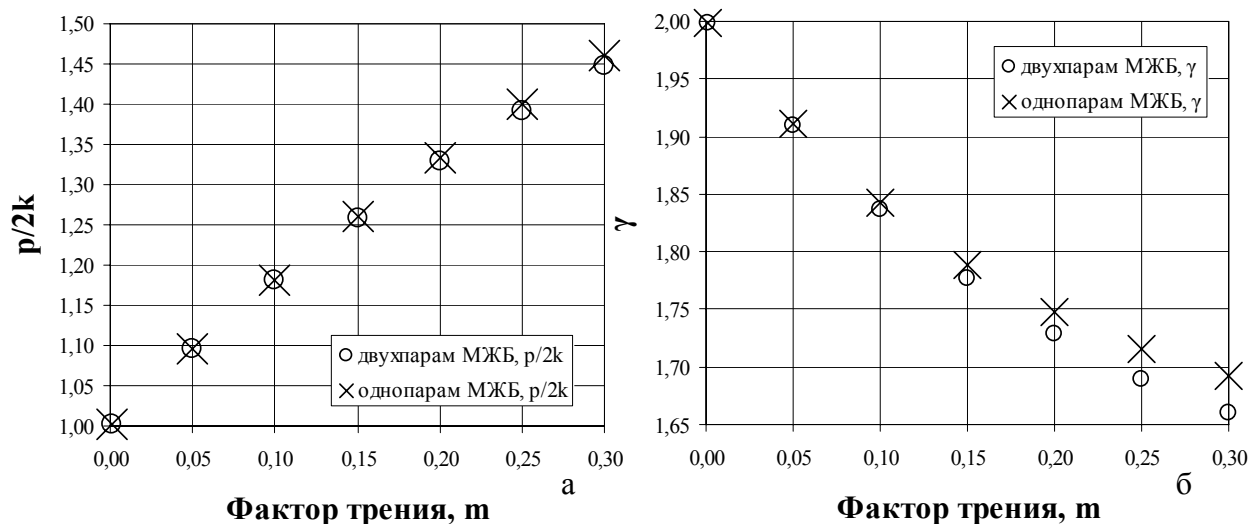


Рис. 3. Сопоставление данных по относительному давлению прессования (а) и суммарной угловой деформации (б), определенных одно- и двухпараметрическим методом жестких блоков (МЖБ)

Как видим из табл. 1, предложенный нами двухпараметрический метод жестких блоков дает меньшее расхождение с полями линий скольжения и, следовательно, является более корректным для анализа энергосиловых параметров процесса РКУП, чем однопараметрическое решение [7].

В то же время соотношения (4), (6) нуждаются в экспериментальной верификации, для чего использовался метод кольцевых сеток [8] в рамках физического моделирования локального пластического течения при РКУП (рис. 4, а).

На основании 35 опытов по осадке пластилиновых $D : d : H = 6 : 3 : 2$ колец между пластинками из органического стекла было определено среднее значение фактора трения $m = 0,159$, где D , d – внешний и внутренний диаметры кольца, а H – высота кольца [9]. Для данного значения фактора трения решениями системы (6) являются значения $x = 0,126$ и $y = 0,274$, откуда, согласно (4), $\gamma = 1,767$ и, следовательно, теоретическая интенсивность деформаций определяется как $e_i = \gamma / \sqrt{3} = 1,020$. Данное теоретическое значение удовлетворительно согласуется с экспериментальной эпюрой на рис. 4, б.

Для экспериментального исследования деформированного состояния заготовки при РКУП была использована исходная кольцевая сетка (рис. 4, а). Измерению подвергались

главные логарифмические деформации и углы наклона главных осей, что давало возможность рассчитывать компоненты тензора деформаций в лабораторной прямоугольной декартовой системе координат.

Были обнаружены три зоны принципиально различного характера течения материала заготовки (рис. 4, а): первая – зона монотонного течения, которая представляет собой часть заготовки, прилегающую к верхней части выходного канала и выходящую на свободную поверхность заготовки; вторая – застойная зона в углу штампа, в которой практически отсутствуют деформации обрабатываемого материала, а между ними – зона интенсивного турбулентного течения, интенсивность которого нарастает с приближением к нижней поверхности выходного канала, где степень формоизменения материала максимальна. В процессе турбулентного течения развиваются большие растягивающие деформации, сопровождаемые поворотом осей течения на значительные углы порядка $30\text{--}45^\circ$ (рис. 4, а), что, возможно, коррелирует с гипотезой Я. Е. Бейгельзимера [6]. Т. к. в турбулентной зоне гидростатическое давление положительно, т. е. течение происходит в схеме всестороннего сжатия по напряжениям, то ресурс пластичности материала не исчерпывается, разрыхления материала не наблюдается.

На конечной стадии процесса течения (рис. 4, в) деформации материала практически выравниваются по объему заготовки за исключением приконтактной зоны у нижнего края выходного канала, где деформации растяжения чрезвычайно велики и могут служить источниками нарушения сплошности материала. Следует обратить внимание, что выравнивание поля деформаций в выходном канале происходит на стадии выдавливания пресс-остатка и обусловлено процессами локального сжатия материала, что способствует более однородной проработке заготовки. Так как процесс выравнивания связан с заключительной стадией выдавливания пресс-остатка, то данная операция, очевидно, является неотъемлемым элементом технологического процесса РКУП.

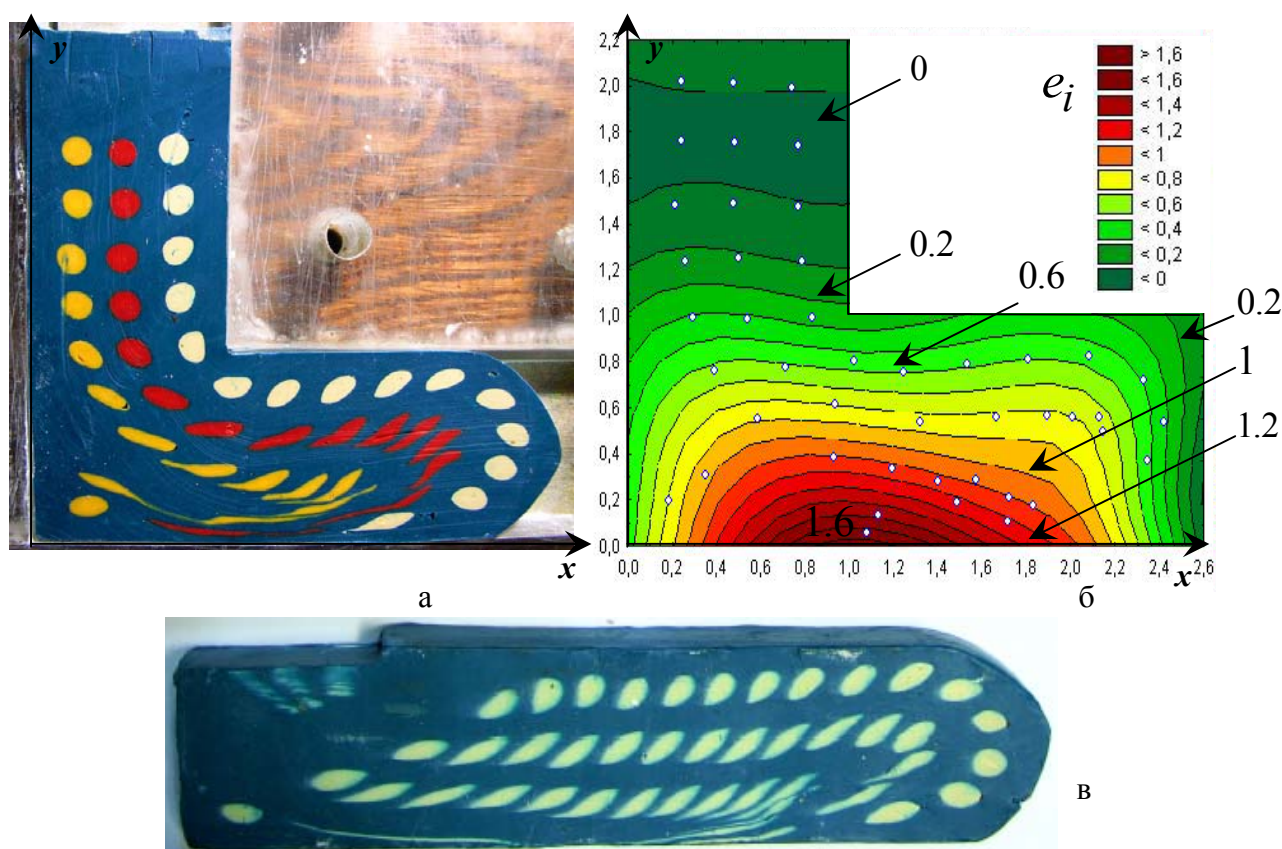


Рис. 4. Пластилиновая модель с исходной кольцевой сеткой в установившемся режиме течения (а) и на заключительном этапе деформирования (в), а также экспериментальная эпюра поля интенсивностей логарифмических деформаций (б)

ВЫВОДЫ

1. С использованием разрывного поля скоростей предложена двухпараметрическая верхняя оценка энергосиловых параметров процесса равноканального углового прессования. Показано, что применение двухпараметрического метода жестких блоков для анализа РКУП в прямоугольном штампе дает меньшее расхождение с полями линий скольжения по сравнению с однопараметрическим методом жестких блоков и, следовательно, является более корректным для анализа параметров процесса РКУП. Двухпараметрический метод жестких блоков позволяет оценить интегральную интенсивность деформаций в предположении однородности их распределения. Применение экспериментального метода кольцевых сеток позволило рассчитать поля интенсивности деформаций с учетом реальной неоднородности деформированного состояния, определить градиенты деформаций и исследовать особенности поворотов осей деформаций. Анализ полученной информации позволяет уточнить локализацию и степень неоднородности зоны интенсивного течения. Найдено хорошее соответствие между теоретическими и усредненными экспериментальными результатами.

2. Хорошая согласованность полученных результатов позволяет рекомендовать применение двухпараметрического метода жестких блоков для определения энергосиловых параметров процесса РКУП в штампах с более сложной конфигурацией, например, имеющих скругленные углы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев Р. З. Создание объемных наноструктурных материалов методами интенсивной пластической деформации для инновационных применений в технике и медицине / Р. З. Валиев // *Физика и техника высоких давлений*. – 2008. – Т. 18. – № 4. – С. 12–20.
2. Segal V. M. *Materials processing by simple shear* / V. M. Segal // *Materials Science and Engineering A*. – 1995. – Vol. 197. – P. 157–164.
3. Altan B. S. *An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion* / B. S. Altan, G. Purcek, I. Miskioglu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 168. – № 1. – P. 137–146.
4. Eivani A. R. *The effect of dead metal zone formation on strain and extrusion force during equal channel angular extrusion* / A. R. Eivani, A. K. Taheri // *Computational Materials Science*. – 2008. – Vol. 42. – Pg. 14–20.
5. Спосіб фізичного моделювання течії пластичних матеріалів : висновок від 23.02.2009 р. № 3194/1 про видачу патенту України : МПК (2006) B21J 5/00, G01 N 3/28 / Лаптев О. М., Періг О. В., Литвинов М. Г., Подлесний С. В. ; власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № 200812900. – 2 с. : іл.
6. Бейгельзимер Я. Е. *Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью* / Я. Е. Бейгельзимер // *Физика и техника высоких давлений*. – 2008. – Том 18. – № 4. – С. 77–86.
7. Лаптев А. М. *Анализ равноканального углового прессования методом жестких блоков* / А. М. Лаптев, Е. Ю. Вяль, А. В. Періг // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА. – 2006. – С. 316–322.
8. Дель Г. Д. *Метод делительных сеток* / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – М. : *Машиностроение*, 1979. – 144 с.
9. Періг А. В. *Компьютерное моделирование течения материалов при равноканальном угловом прессовании : анализ движения вязкой среды и экспериментальная верификация методом маркеров* / А. В. Періг, А. М. Лаптев, Н. Н. Голоденко, А. Ю. Лошманов, М. Г. Литвинов // *Обработка материалов давлением : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА. – 2009. – № 1 (20). – С. 57–62.

Періг А. В. – ассистент ДГМА;
Лаптев А. М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТиТОМ ДГМА;
Тышкевич А. В. – канд. техн. наук, доц. ДГМА;
Бондаренко Е. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: olexander.perig@gmail.com
alexander.perig@dgma.donetsk.ua