



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 539.3

Д.С. ПЕРШИН

Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия

Н.В. ОВЧИННИКОВА, канд. физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ В ДВУМЕРНОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКАХ

*Выполнено численное моделирование процесса равноканального углового прессования. Рассмотрены двумерная и трехмерная постановки задачи, на основе сравнения результатов расчета для обоих вариантов показана возможность использования для анализа технологического процесса в некоторых случаях двумерной постановки вместо трехмерной с целью уменьшения ресурсоемкости задачи. Основное внимание уделено кинематике процесса.*

**Ключевые слова:** равноканальное угловое прессование, интенсивные пластические деформации, численное моделирование, упрочнение, пластичность

**Введение.** Равноканальное угловое прессование (РКУП) является одним из наиболее эффективных методов интенсивной пластической деформации (ИПД), используемых для получения ультрамелкозернистой структуры в металлах и сплавах. Такие материалы с характерным размером зерна порядка микрометров и менее обладают рядом уникальных свойств и находят применение в различных областях современной техники.

При использовании данного метода заготовка из обрабатываемого материала, имеющая форму продолговатого бруса (обычно квадратного или круглого сечения), продавливается через изогнутый канал постоянного сечения (рисунок 1). Сам канал изготовлен в матрице из высокопрочного материала. После одного цикла обработки на выходе канала получается брус с исходными геометрическими характеристиками, но со значительно улучшенной проработанной структурой. Неизменность поперечного сечения заготовки позволяет неоднократно повторять процесс для каждого образца, усиливая тем самым конечный эффект обработки.

Численному моделированию процесса РКУП посвящено большое количество публикаций, среди которых встречаются различные варианты постановки задачи [1]. В большинстве из них используется двумерная постановка. Например, в работе [2] исследовано влияние формы канала и условий трения на течение материала. В качестве модели деформируемого материала обычно используется модель жестко- или вязкопластического материала (упругие деформации не учитываются), и лишь в некоторых работах — модель упруго-пластического материала с деформационным упрочнением.

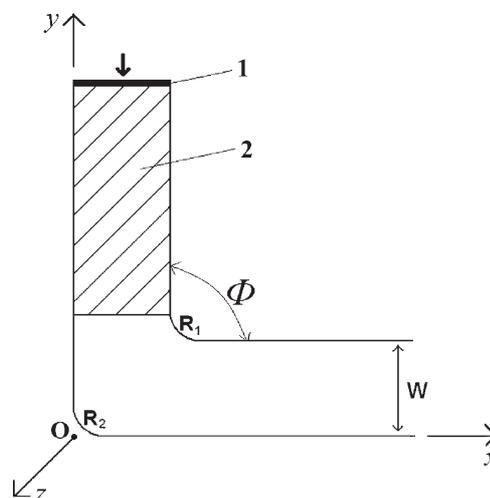


Рисунок 1 — Схема установки РКУП. Геометрические параметры модели: 1 — пуансон; 2 — заготовка

Теоретические основы метода РКУП для жестко-пластического материала были исследованы В. Сегалом [3]. Им, в частности, были получены формулы (1) и (2) зависимости величины интенсивности деформаций и давления на пуансон от значения угла  $\Phi$  пересечения каналов:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \left( \frac{\Phi}{2} \right), \quad (1)$$

$$P_{\text{ЕСАР}} = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \left( \frac{\Phi}{2} \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i$  — интенсивность деформаций (эффективная деформация),  $\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \times \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + 6(\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{xz} + \varepsilon_{yz})^2}$ ;  $P_{ЕСАР}$  — давление на пуансон;  $\sigma_s$  — предел текучести материала.

Все результаты получены в двумерной постановке в случае отсутствия трения без скруглений углов на пересечении каналов. В работах, посвященных численному моделированию процесса РКУП, часто производится сравнение полученных результатов с этими теоретическими формулами [4].

Трехмерная постановка используется значительно реже. В работе [5] утверждается, что моделировать процесс РКУП следует именно в трехмерной постановке. При компьютерном моделировании в цитируемой работе использовалась модель вязкопластического материала; упругие деформации не учитывались. Для большей приближенности к реальному технологическому процессу задача решается как трехмерная, симметрия задачи относительно плоскости загиба канала не используется.

Следует, однако, заметить, что в трехмерной постановке вопрос о переборе параметров представляется сложным. Действительно, величина области однородности и степень измельчения зерна при обработке РКУ прессованием зависят от ряда факторов — геометрических характеристик канала (угол пересечения каналов  $\Phi$ , внешний  $R_1$  и внутренний  $R_2$  радиусы закругления на их пересечении), контактных и температурных условий. Для анализа влияния этих факторов на итоговый результат и подбора оптимального соотношения этих параметров может потребоваться большое количество расчетов с вариациями этих параметров. Моделирование задачи в трехмерной постановке оправдано большей приближенностью к моделируемому процессу, однако данная постановка трудоемка и требует значительных затрат времени и объема памяти компьютера. Это, в свою очередь, накладывает ограничения при конечно-элементном моделировании, вынуждая выбирать меньшее количество элементов и ухудшать точность расчета. Понятно, что применение двумерной постановки существенно снизит трудоемкость задачи, позволив использовать гораздо более мелкое конечно-элементное разбиение заготовки. Увеличение количества элементов разбиения, в свою очередь, улучшит точность расчета.

Целью настоящей работы является выяснение того, в каких случаях для оценки кинематики процесса допустимо использование двумерной постановки вместо трехмерной, для чего было произведено сравнение результатов расчета задачи в обоих вариантах постановки.

**Постановка задачи.** В расчете принимаются следующие геометрические параметры матрицы.

Канал установки для РКУ прессования представляет собой пересечение под углом 90 градусов двух прямолинейных каналов квадратного сечения. В верхнем канале расположен деформируемый образец, его верхний торец соприкасается с плоскостью пуансона. Отношение ширины канала  $W$  к длине заготовки  $L$  равно 1:5.

Внутренний и внешний углы в месте загиба канала сглажены дугой окружности. Радиусы окружности  $R_1$  и  $R_2$  приняты равными 0,2 ширины канала  $W$ .

Задача предполагается симметричной относительно срединного сечения, лежащего в плоскости загиба кана-

ла, поэтому рассматривается лишь одна из половин, на которые делит это сечение канал с заготовкой.

**Модель материала.** Используются определяющие соотношения теории пластического течения с изотропным упрочнением. Рассматривается модель линейно упрочняющегося материала с малым упрочнением. Процесс РКУП подразумевает конечные деформации, поэтому используются тензор напряжений Коши и тензор деформаций Генки. Значение модуля упругости  $E$  принято равным  $2 \cdot 10^{11}$  Па, что соответствует модулю Юнга стали. Модуль линейного упрочнения  $E_1$  равен  $2 \cdot 10^7$  Па, таким образом, отношение коэффициентов  $E_1$  к  $E$  равно  $1 \cdot 10^{-4}$ , то есть материал близок к идеально-пластическому. За значение предела текучести  $\sigma_s$  взята величина  $4 \cdot 10^8$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu$  равен 0,3.

Граничные условия:

- стенки канала принимаются абсолютно жесткими;
- задается перемещение абсолютно жесткого пуансона;
- нулевые (по оси  $Oz$ ) перемещения в плоскости симметрии задачи;
- в местах контакта заготовки со стенками канала и плоскостью пуансона используется условие трения Кулона, коэффициент трения  $\mu$  принимается равным 0,11; рассмотрен и случай отсутствия трения.

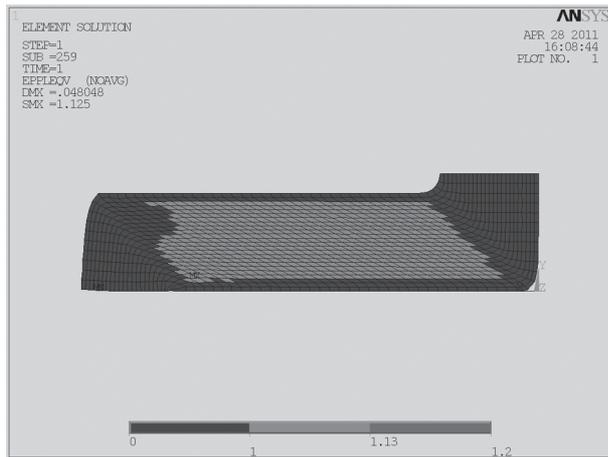
Помимо трехмерной модели рассматривается задача плоской деформации (двумерная постановка для канала бесконечной длины по оси  $Oz$ ,  $\varepsilon_z = u_z = 0$ ). При этом все параметры математической модели выбираются аналогичным образом.

Для трехмерной постановки произведено конечно-элементное равномерное разбиение заготовки на 13824 ( $48 \times 24 \times 12$ ) восьмиузловых (линейных) элемента. Величина шага перемещения пуансона рассчитывалась автоматически самой программой. Перестроение конечно-элементной сетки на каждом шаге не производилось. В двумерной задаче для сравнения с результатами трехмерной постановки была построена сетка из 1152 ( $48 \times 24$ ) четырехузловых линейных элементов. Характерное время расчета задачи оказывалось минимум в 10 раз меньше времени расчета аналогичной задачи в трехмерной постановке, в зависимости от контактных условий. Выбранная сетка в сочетании с конкретными геометрическими характеристиками канала могла оказаться слишком грубой и привести к значительным неточностям в отображении области однородных деформаций. И для проверки этого предположения был произведен расчет задачи в двумерной постановке с мелкой сеткой разбиения ( $160 \times 32 = 5120$  элементов).

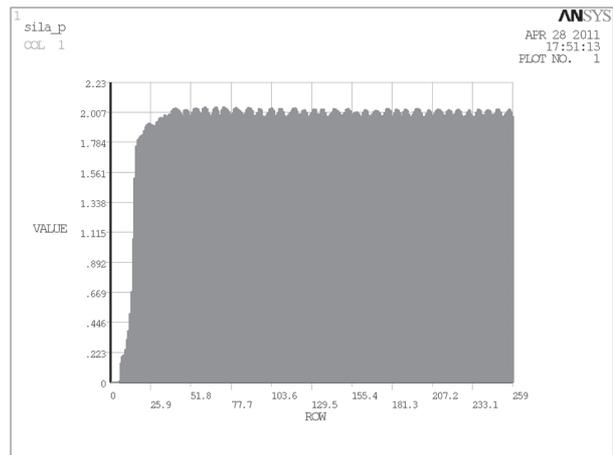
**Результаты.** Произведены расчеты для трехмерной и двумерной постановок с наличием и отсутствием трения. Задача решена методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS 11.0.

Во всех выполненных расчетах величина интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_i$  в области однородности оказалась в диапазоне от 0,98 до 1,13, что хорошо согласуется с полученным из теоретической формулы (1) значением 1,15.

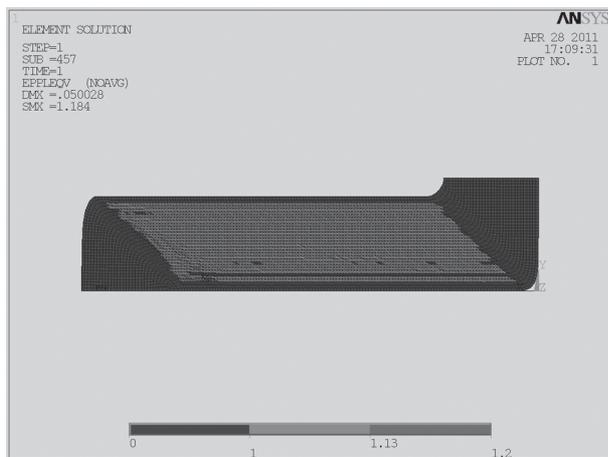
Для оценки возможности использования грубой сетки конечно-элементного разбиения было произведено качественное сравнение результатов расчета для грубой и мелкой сеток в двумерной постановке задачи (рисунок 2). Области однородных деформаций на рисунках состоят из элементов одинакового цвета и, как видно из иллюстраций, величина интенсивности деформаций в области однородности одинакова в обоих случаях и лежит в интер-



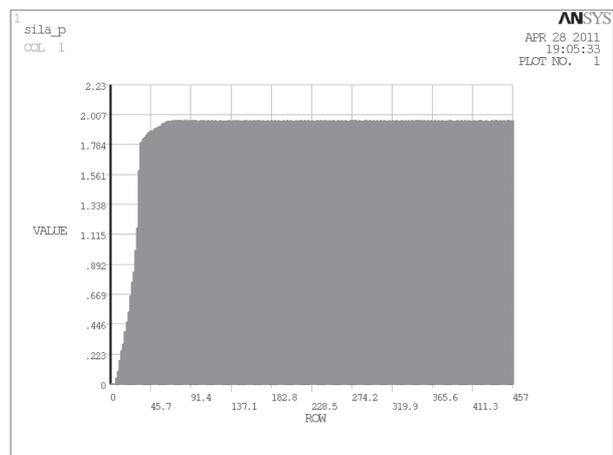
а



а



б



б

Рисунок 2 — Результаты расчета задачи в двумерной постановке с отсутствием трения для грубой (а) и мелкой (б) сеток конечно-элементного разбиения. Величина интенсивности деформаций

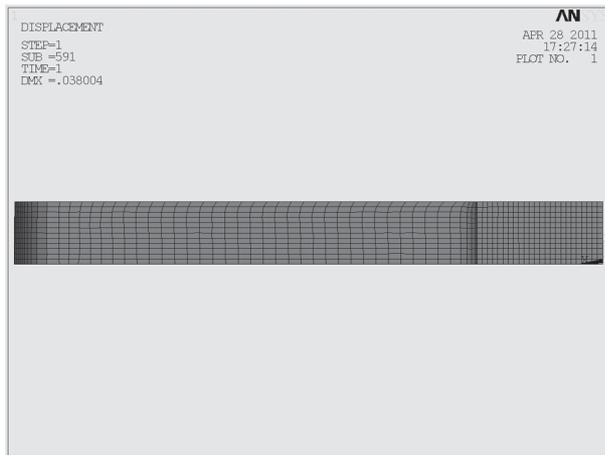
вале от 1 до 1,1, что близко к теоретическому предсказанию (1). Сами области также близки по размерам и форме. На рисунке 3 для обоих вариантов показана безразмерная величина  $P$  давления на пуансон, отнесенного к  $\sigma_s/\sqrt{3}$ . В случае с грубой сеткой график немонокотный, что связано с большим размером элемента разбиения. Однако средняя величина  $P$  близка к полученному из теоретической формулы (2) результату, равному 2. На графике, соответствующем случаю с мелкой сеткой, отклонение от среднего значения существенно меньше; величина  $P$  равна 1,96.

На рисунке 4 приведена деформированная сетка конечно-элементного разбиения для трехмерной задачи при наличии и без трения для плоскости, параллельной плоскости  $Oxz$ . Как видно из иллюстрации, все точки, принадлежавшие в исходном состоянии заготовки одной плоскости, параллельной плоскости  $Oxy$ , после обработки остаются в этой же плоскости. Таким образом, можно наблюдать за деформациями, рассматривая плоские продольные сечения объемной заготовки. Поперечные сечения материала деформируются следующим образом: линии, изначально параллельные оси  $Oy$ , после окончания обработки имеют изгиб лишь вблизи контакта заготовки с боковой стенкой канала, что является результатом влияния контактных усилий. Можно сделать вывод

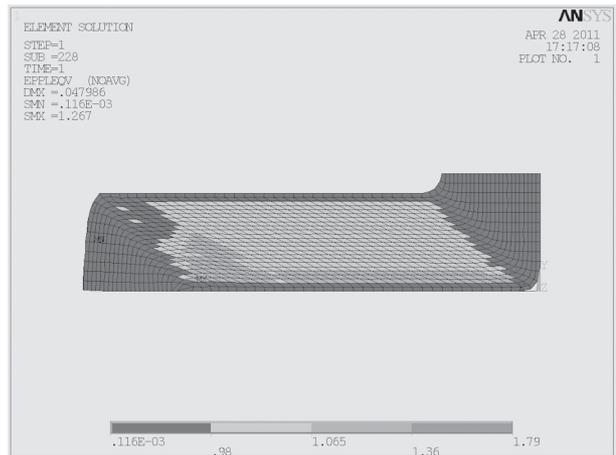
Рисунок 3 — Результаты расчета задачи в двумерной постановке с отсутствием трения для грубой (а) и мелкой (б) сеток конечно-элементного разбиения. Величина  $P$  безразмерного давления на пуансон, отнесенного к  $\sigma_s/\sqrt{3}$

о том, что поля интенсивности деформаций в продольных сечениях заготовки, не находящиеся в непосредственной близости от боковых стенок канала, мало отличаются. Таким образом, в случае, когда необходимо изучить деформации лишь в области однородности, для анализа кинематики процесса достаточно рассматривать только одно сечение плоскостью симметрии канала. Например, когда требуется получить значения геометрических параметров канала, для которых достигается определенная величина деформации, можно осуществлять поиск значений этих параметров (вероятно, с помощью перебора) в двумерной постановке. В трехмерной постановке уже можно проводить проверку получаемых в области однородности результатов, выяснять форму и размеры этой области.

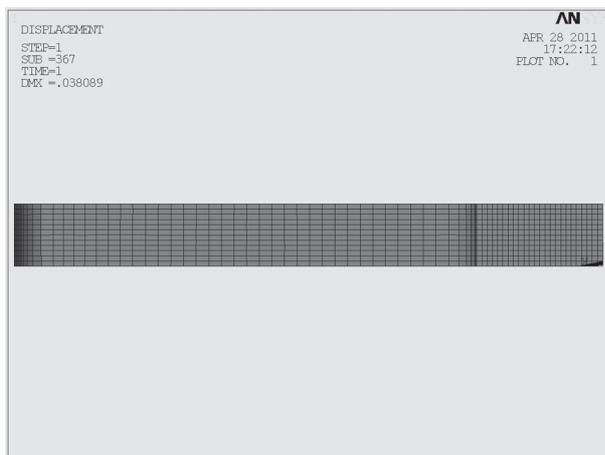
В случае с нулевым трением поля интенсивности деформаций во всех продольных сечениях деформируемой заготовки одинаковы благодаря отсутствию сил трения. В таком случае использование двумерной постановки тем более предпочтительно. Разумеется, в реальных технологических процессах очень малое трение в местах контакта заготовки со стенками канала практически недостижимо.



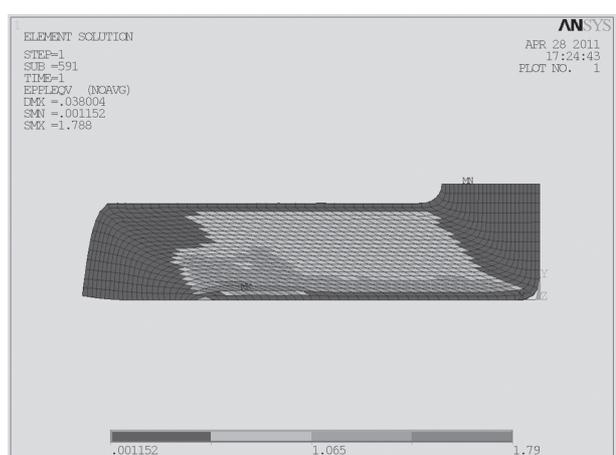
а



а



б



б

Рисунок 4 — Деформированная заготовка, вид со стороны входного канала: а — коэффициент трения  $\mu = 0,11$ ; б —  $\mu = 0$

Рисунок 5 — Результат расчета задачи при наличии трения: а — модель 2D; б — модель 3D

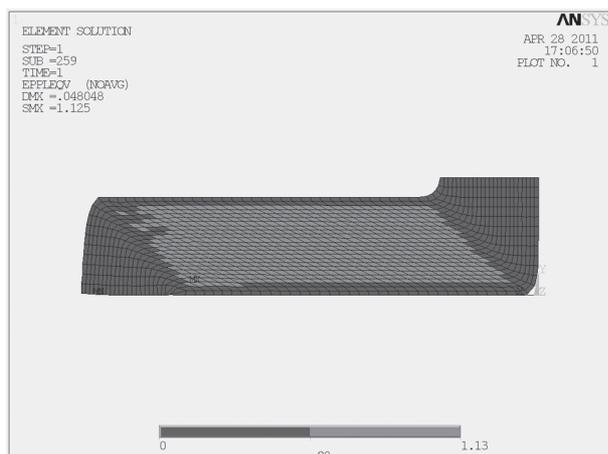
Итак, в некоторых случаях при решении трехмерной задачи допустимо исследование срединного плоского сечения вместо всей заготовки. Для окончательной проверки возможности использования двумерной постановки вместо трехмерной необходимо провести сравнение результатов расчета плоской задачи с результатами решения для срединного сечения трехмерной постановки.

На рисунке 5 показаны сечения плоскостью симметрии деформированных заготовок в двумерной (а) и трехмерной (б) постановках для случая с ненулевым трением. На рисунке изображены величина интенсивности деформаций  $\epsilon_p$ , а также деформированная сетка конечно-элементного разбиения. Величина интенсивности деформаций в области однородности в обоих случаях одинакова. Значительные расхождения в результатах для плоского и трехмерного случаев наблюдаются лишь в области, близкой к переднему торцу заготовки. Эта область находится в части заготовки, первой прошедшей загиб канала; с нее начиналось деформирование образца. Деформирование частей заготовки, прошедших загиб канала позднее, соответствует установившемуся процессу, распределение интенсивности деформаций по ширине канала в направлении оси  $Ox$  одинаково как в трехмерной, так и в двумерной постановках. Область однородности в этой части имеет одинаковые границы. Таким образом, допустимо исполь-

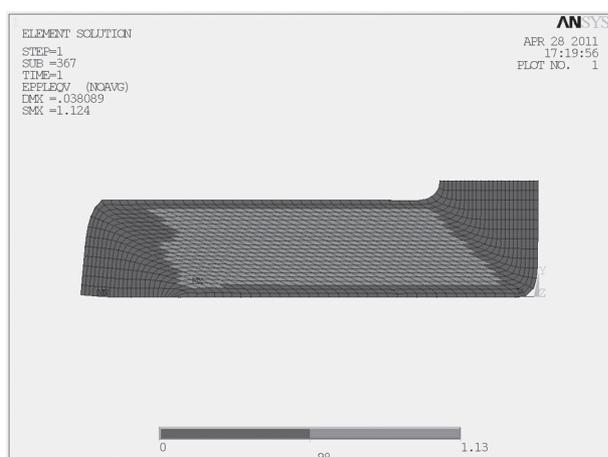
зование двумерной постановки вместо трехмерной, если целью является только определение области однородности. При этом необходимо учитывать, что область однородности в трехмерном случае имеет меньшую протяженность вдоль оси  $Ox$ .

На рисунке 6 изображены поля интенсивности деформаций в двумерной (а) и трехмерной (б) постановках при нулевом трении. Форма и размер области однородности, а также величина интенсивности деформаций в этой области для двумерной и трехмерной постановок задачи одинаковы. Однако и области неоднородности, находящиеся вблизи границы заготовки со стенками выходного канала, в обоих случаях практически не отличаются. В рассмотренных на рисунке 6 случаях величина интенсивности деформаций в области однородности примерно одинакова и лежит в интервале от 0,98 до 1,13, что близко к полученному из теоретической формулы значению 1,15. Величина безразмерного давления на пуансон  $P$  для обоих вариантов постановки также близка к теоретическим результатам: в плоском случае она постоянна и равна 1,96, в трехмерной постановке убывает со значения 2 до 1,94 с ростом величины перемещения пуансона.

Таким образом, применение модели упруго-пластического материала с малым упрочнением дало результа-



а



б

Рисунок 6 — Результат расчета задачи для случая с отсутствием трения: а — модель 2D; б — модель 3D

ты, близкие к данным теоретических формул, полученных для жестко-пластического материала.

**Заключение.** Результаты расчета показали, что для трехмерной и двумерной постановок итоговые области однородной деформации и величины интенсивности деформаций с некоторой точностью совпадают. Различия составляют лишь деформированные области образца вблизи переднего торца заготовки. Но и этот результат касается лишь варианта с наличием трения. В случае отсутствия трения и в этих областях результаты обеих постановок практически не различаются.

Величины  $\epsilon_i$  и  $P$  в двумерной и трехмерной постановках при отсутствии трения близки к данным теоретических формул (1) и (2), полученных для жестко-пластическо-

го материала. Таким образом, использование модели линейно упрочняющегося материала с малым упрочнением позволяет получить результаты, близкие к результатам использования модели жестко-пластического материала.

Итак, если необходимо получить оценку величины деформации, а также размеров и формы области однородности в продольном сечении образца, достигаемых при одинаковой геометрии и свойствах материала, допустимо использование экономичной двумерной постановки задачи. Но для контрольной проверки полученных результатов, а также для получения распределения деформаций в поперечном сечении заготовки требуется использование трехмерной модели процесса.

#### Список обозначений

$\Phi$  — угол пересечения каналов;

$\epsilon_i$  — интенсивность деформаций (эффективная деформация);

$P_{Ecap}$  — давление на пуансон;

$\sigma_s$  — предел текучести материала;

$\epsilon_{ij}$  — тензор деформаций;

$W$  — ширина канала;

$L$  — длина обрабатываемой заготовки;

$R_1, R_2$  — соответственно внутренний и внешний радиусы закруглений на пересечении каналов;

$E$  — модуль упругости материала;

$E_1$  — модуль линейного упрочнения материала;

$\nu$  — коэффициент Пуассона материала;

$P$  — безразмерная величина давления на пуансон, отнесенного к  $\sigma_s / \sqrt{3}$ .

#### Список литературы

1. Semiatin, S.L. Models for Severe Plastic Deformation by Equal-Channel Angular Extrusion / S.L. Semiatin, A.A. Salem, M.J. Saran // JOM. — 2004. — Vol. 56; Issue 10. — pp. 58–63.
2. Jong-Woo Park Effect of die shape on the deformation behavior in equal-channel angular pressing / Jong-Woo Park, Jin-Yoo Suh // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2001. — Vol. 32; Issue 12. — pp. 3007–3014.
3. Segal, V.M. Materials processing by simple shear / V.M. Segal // A Materials Science and Engineering. — 1995. — 197. — pp. 157–164.
4. Computational simulation of an IF-steel deformed by equal channel angular pressing via the finite element method / N. de Medeiros [et al.] // Mechanics of Solids in Brazil. — 2007. — pp. 309–320.
5. Камалетдинов, И. Разработка и исследование математической модели процесса равноканального углового прессования / И. Камалетдинов, В. Юсупов, Н. Биба // Machines, Technologies, Materials. — 2007. — No 2–3. — pp. 122–124.
6. Кайбышев, О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев. — М.: Наука, 2002. — 438 с.
7. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров: справ. пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 512 с.

Pershin D.S., Ovchinnikova N.V.

#### Computational investigation of kinematics of the equal channel angular pressing process in two-dimensional and three-dimensional statements of the problem

Numerical simulation of equal channel angular pressing process was done. Two-dimensional and three-dimensional statements of the problem were considered. Possibility of usage (for analysis of technological process) in some cases 2D statement instead of 3D statement for the purpose of decrease resource complexity of the problem was demonstrated. It was done on basis of comparison calculation's results for both cases. Principal attention was spared for kinematics of the process.

Поступила в редакцию 02.05.2011.