

PACS: 81.40.Ef

А.М. Лаптев, А.В. Периг, С.В. Подлесный

## МЕХАНИКА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ МАТЕРИАЛА С ДЕФОРМАЦИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Донбасская государственная машиностроительная академия  
ул. Шкадинова, 72, г. Краматорск, 84313, Украина  
E-mail: laptev@dgma.donetsk.ua

*Методом жестких блоков исследовано равноканальное угловое прессование (РКУП) идеально пластичного материала и материала с деформационным упрочнением. Для идеально пластичного материала зависимости относительного давления РКУП и суммарного сдвига от фактора трения хорошо согласуются с результатами анализа по методу линий скольжения. Приведен пример определения параметров прессования меди как упрочняющегося материала. Установлено, что упрочнение способствует появлению относительно большой застойной зоны и некоторому снижению суммарного сдвига при малых и средних значениях фактора трения. С дальнейшим ростом трения влияние упрочнения на размер застойной зоны и сдвиг заметно уменьшается.*

### Введение

Равноканальное угловое прессование является одним из современных методов получения материалов с ультрадисперсной кристаллической структурой и уникальными свойствами [1]. Метод РКУП основан на одно- или многократном деформировании заготовки в штампе с двумя пересекающимися каналами одинакового поперечного сечения (рис. 1,а), что позволяет накопить значительную деформацию сдвига и существенно уменьшить размер зерен.

Для изучения механики деформирования при РКУП использовали методы линий скольжения, верхней оценки и конечных элементов [2–4]. На примере исследования РКУП идеально пластичного материала нами была показана возможность применения для таких целей метода жестких блоков [5]. В настоящей работе анализ РКУП этим методом распространен на случай прессования материалов с деформационным упрочнением. Изучено влияние упрочнения на образование и характер развития застойной зоны, примыкающей к внешнему углу штампа, и на величину суммарного сдвига. Приведен пример расчета давления прессования при разных уровнях контактного трения.

Общий теоретический анализ

В соответствии с методом жестких блоков [6] разобьем плоскую модель заготовки на четыре жестких блока, как показано на рис. 1,б. Будем рассматривать процесс РКУП как результат взаимного перемещения блоков 1–3 относительно друг друга. Предположим также возможность образования симметричной застойной зоны в виде жесткого треугольного блока 4, примыкающего к внешнему углу штампа. Отметим, что допущение о формировании асимметричной застойной зоны приводит к нарушению положения о несжимаемости прессуемого материала. Годограф скоростей, соответствующий принятому разбиению на блоки, приведен на рис. 1,в. Высоту застойной зоны определим как  $h = ax$ , где  $a$  – ширина каналов,  $x \in [0; 1]$  – относительная высота застойной зоны. Напряжение трения  $\tau_f$  на участках контакта прессуемого материала и стенок штампа  $AG$  и  $BF$  будем учитывать согласно закону Зибеля:

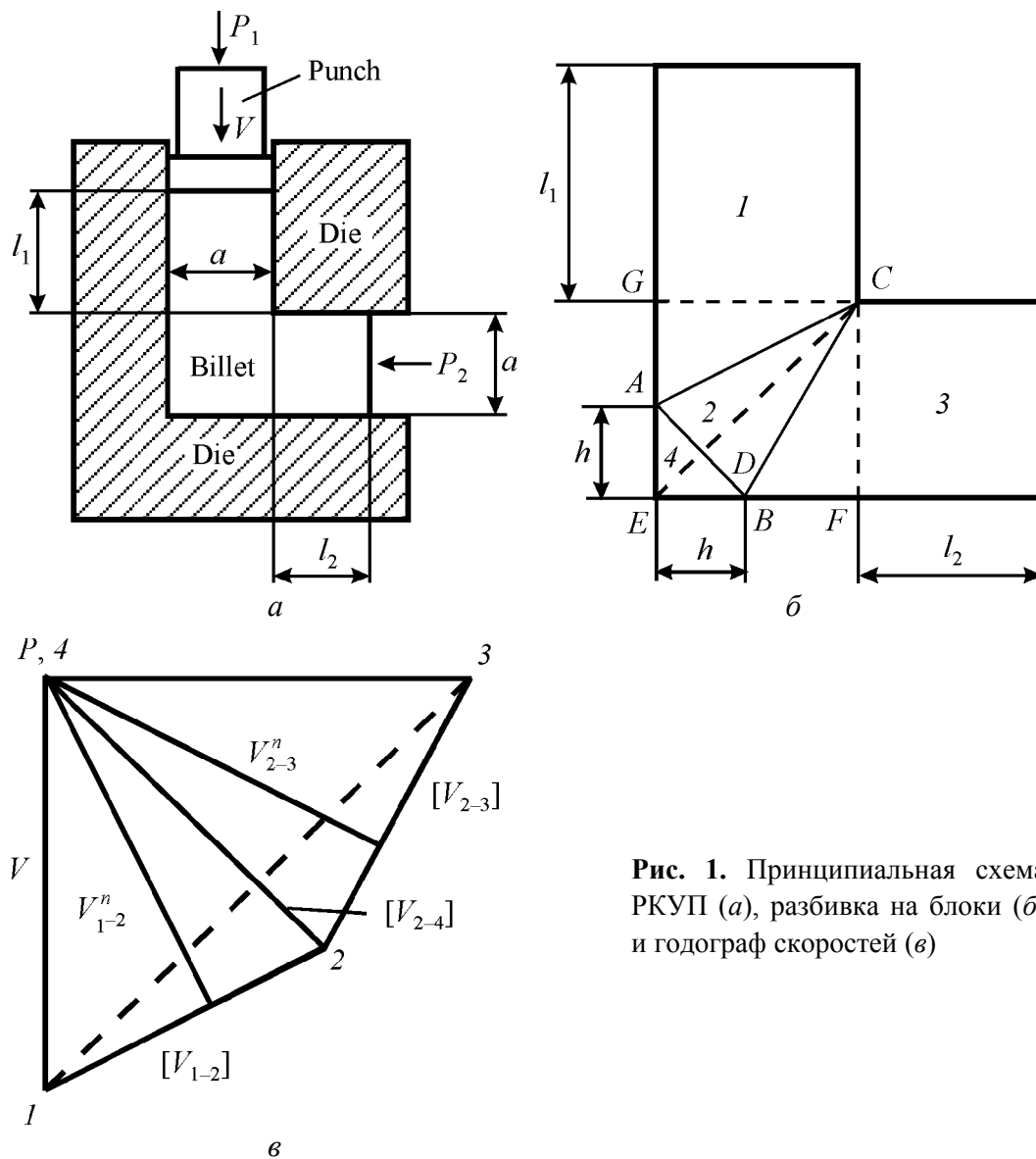


Рис. 1. Принципиальная схема РКУП (а), разбивка на блоки (б) и годограф скоростей (в)

$$\tau_f = 2mk, \quad (1)$$

где  $m \in [0; 0.5]$  – фактор трения,  $k = \sigma_s / \sqrt{3}$  – постоянная пластичности.

Для упрочняемого материала при заданной разбивке на жесткие блоки уравнение баланса мощностей внешних и внутренних сил имеет вид

$$paV_{1-4} = k_{1-2}l_{1-2}[V_{1-2}] + k_{2-3}l_{2-3}[V_{2-3}] + k_{2-4}l_{2-4}[V_{2-4}] + 2m(k_{AG}l_{AG} + k_{BF}l_{BF})V_{1-4}, \quad (2)$$

где  $p$  – давление прессования;  $V_{1-4}$  – скорость металла во входном и в выходном каналах штампа;  $l_{i-j}$  – длины общих границ блоков  $i$  и  $j$ ;  $[V_{i-j}]$  – скорости их относительного перемещения;  $k_{i-j}$ ,  $k_{AG}$  и  $k_{BF}$  – постоянные пластичности на границах блоков соответственно  $i-j$ ,  $AG$  и  $BF$ .

Деформация сдвига на линии разрыва скоростей  $i-j$  определяется по формуле

$$\gamma_{i-j} = [V_{i-j}] / V_{i-j}^n, \quad (3)$$

где  $V_{i-j}^n$  – составляющая вектора скорости перемещения на линии разрыва скоростей  $l_{i-j}$ , перпендикулярная к этой линии [6]. Из годографа на рис. 1, в и соотношения (3) находим

$$\gamma_{1-2} = \gamma_{2-3} = \gamma = \frac{1 + (1-x)^2}{2-x}. \quad (4)$$

Суммарная деформация сдвига  $\gamma_s$  состоит из деформаций сдвига на линиях разрыва скоростей  $l_{1-2}$  и  $l_{2-3}$ , т.е.

$$\gamma_s = \gamma_{1-2} + \gamma_{2-3} = 2\gamma. \quad (5)$$

Для учета упрочнения определим значения постоянных пластичности на поверхностях разрыва скоростей  $l_{i-j}$  в зависимости от усредненной величины эквивалентной деформации  $\varepsilon_{i-j}$ , которая связана с деформацией сдвига соотношением

$$\varepsilon_{i-j} = \frac{\gamma_i + \gamma_j}{2\sqrt{3}}, \quad (6)$$

где  $\gamma_i$  и  $\gamma_j$  – деформации сдвига, накопленные блоками  $i$  и  $j$  [6]. Так,  $\varepsilon_{1-2} = \gamma / (2\sqrt{3})$ ,  $\varepsilon_{2-3} = 3\gamma / (2\sqrt{3})$  и  $\varepsilon_{2-4} = \gamma / (2\sqrt{3})$ ;  $\varepsilon_{AC} = 0$  и  $\varepsilon_{DB} = 2\gamma / \sqrt{3}$ . Найденные значения необходимо подставить в формулу, описывающую деформационное упрочнение, например

$$k_{i-j} = k_0 + A(\varepsilon_{i-j})^n, \quad (7)$$

где  $k_0$ ,  $A$  и  $n$  – постоянные коэффициенты, характеризующие вид кривой упрочнения. В частности, для меди М4  $k_0 = 46.2$  МПа,  $A = 213.6$  МПа и  $n = 0.41$  [7].

Согласно методу верхней оценки наилучшее приближение действительных значений давления РКУП и сдвига соответствует минимальной величине  $p$  в формуле (2).

В случае идеально пластичного материала постоянная пластичности  $k$  на границах всех блоков одинакова, что позволяет преобразовать уравнение (2) к виду

$$paV_{1-4} = k(l_{1-2}[V_{1-2}] + l_{2-3}[V_{2-3}] + l_{2-4}[V_{2-4}]) + 2mk(l_{AG} + l_{BF})V_{1-4}. \quad (8)$$

Анализ выражения (8) с учетом соотношений между отрезками  $l_{i-j}$  и скоростями  $[V_{i-j}]$ , найденными из рис. 1, б и в, показывает, что минимум давления  $p$  в этом случае достигается при

$$x = 2 - \frac{2}{\sqrt{1+2m}}. \quad (9)$$

### Обсуждение результатов и пример расчета

Рассмотрим вначале результаты для идеально пластичного материала. На рис. 2 показаны полученные по формулам (4), (5), (8) и (9) зависимости относительного давления прессования  $p/2k$  и суммарного сдвига  $2\gamma$  от фактора трения. Также приведены соответствующие зависимости, найденные методом линий скольжения [2]. Отметим хорошее соответствие результатов, полученных методами жестких блоков и линий скольжения.

Далее приведем пример расчета параметров РКУП для упрочняющегося материала – меди М4. Сначала при различных значениях параметра  $x$ , изменяющихся от 0 до 1, по формулам (4) и (6) определим усредненные эквивалентные деформации на границах блоков. Затем по формуле (7) рассчитаем соответствующие значения постоянной пластичности. После этого для заданного значения фактора трения  $m$  из формулы (2) найдем значения давления прессования  $p$  в функции параметра  $x$ . В качестве наилучшего приближения реальных величин выберем минимальное значение  $p$  и соответствующее ему значение  $x$ . Таким образом, найдем относительную высоту застойной зоны  $x$  и затем по формулам (4) и (5) – суммарную деформацию сдвига.

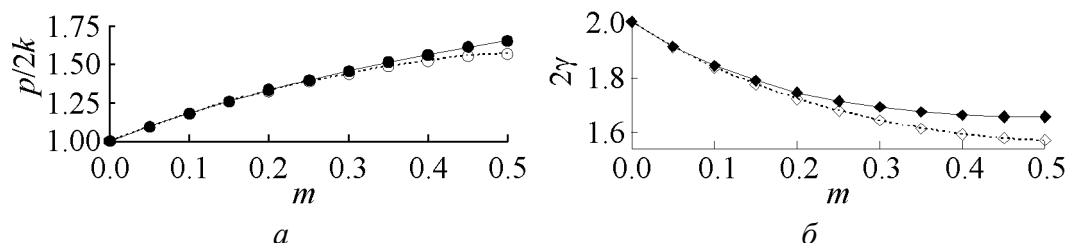
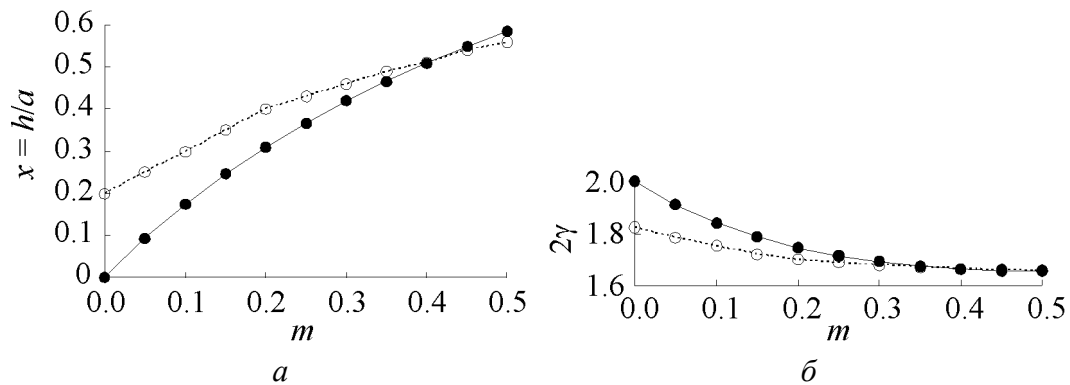
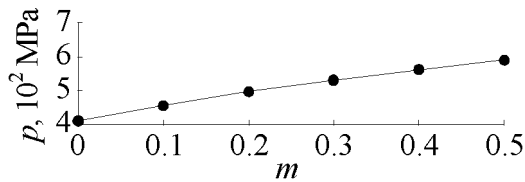


Рис. 2. Зависимости относительного давления (а) и суммарного сдвига (б) от фактора трения, рассчитанные методами линий скольжения (—○—) и жестких блоков (—●—) для идеально пластичного материала



**Рис. 3.** Зависимости относительной высоты застойной зоны (а) и суммарного сдвига (б) от фактора трения для идеально пластичного (—●—) и упрочняющегося (—○—) материалов



**Рис. 4.** Расчетная зависимость давления РКУП от фактора трения для меди М4

На рис. 3 представлены полученные зависимости относительной высоты застойной зоны и суммарного сдвига от фактора трения. Приведены также данные для гипотетического идеально пластичного материала. Из рисунка следует, что упрочнение способствует появлению

относительно большой застойной зоны и некоторому снижению суммарного сдвига при малых и средних значениях фактора трения. С дальнейшим ростом трения влияние упрочнения на размеры застойной зоны и сдвиг заметно уменьшается.

На рис. 4 приведены результаты расчета давления прессования заготовок из М4 при разных уровнях контактного трения, которые могут быть использованы при выборе оборудования для РКУП этого материала.

### Выводы

Разработана методика определения параметров РКУП заготовок из упрочняющегося материала. Показано, что упрочнение способствует появлению относительно большой застойной зоны и некоторому снижению суммарного сдвига при малых и средних значениях фактора трения. С дальнейшим ростом трения влияние упрочнения на размеры застойной зоны и сдвиг заметно уменьшается.

1. R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Prog. Mater. Sci. **51**, 881 (2006).
2. В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский, В.И. Копылов, Изв. АН СССР. Металлы № 1, 115 (1981).
3. B.S. Altan, G. Purcek, I. Miskioglu, J. Mater. Proc. Techn. **168**, 137 (2005).
4. I.Y. Suh, H.S. Kim, I.W. Park, J.Y. Chang, Scr. Mater. **44**, 677 (2001).

5. А.М. Лантев, Е.Ю. Валь, А.В. Периг, в сб.: Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, ДГМА, Краматорськ (2006), с. 316.
6. Л.Г. Степанский, Расчеты процессов обработки металлов давлением, Машиностроение, Москва (1979).
7. А.Ф. Третьяков, Г.К. Трофимов, М.К. Гурьянова, Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. Справочник, Машиностроение, Москва (1971).

*О.М. Лантев, О.В. Периг, С.В. Підлісний*

### МЕХАНІКА РІВНОКАНАЛЬНОГО КУТОВОГО ПРЕСУВАННЯ МАТЕРІАЛУ З ДЕФОРМАЦІЙНИМ ЗМІЦНЕННЯМ

Методом жорстких блоків досліджено рівноканальне кутове пресування (РККП) ідеально пластичного матеріалу і матеріалу з деформаційним зміцненням. Для ідеально пластичного матеріалу залежності відносного тиску РККП і сумарного зсуву від фактору тертя добре узгоджуються з результатами аналізу за методом ліній ковзання. Наведено приклад визначення параметрів пресування міді як матеріалу, що зміцнюється. Встановлено, що зміцнення сприяє появі відносно великої застійної зони і деякому зниженню сумарного зсуву при малих і середніх значеннях фактору тертя. З подальшим зростанням тертя вплив зміцнення на розмір застійної зони і зсув помітно зменшується.

*A.M. Laptev, A.V. Perig, S.V. Podlesny*

### MECHANICS OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING OF STRAIN-HARDENING MATERIAL

The equal-channel angular pressing (ECAP) of both ideally plastic and strain-hardening materials was investigated by rigid blocks method. The dependences of relative ECAP pressure and summary shear on friction factor for ideally plastic material are in good agreement with results of slip line analysis. An example of pressing parameters determination for copper as strain-hardening material is presented. It was found that strain hardening promotes appearance of relatively large dead zone and some decrease of summary shear at small and mean values of friction factor. With further increase of friction the influence of strain hardening on dead zone dimension and shear substantially decreases.

**Fig. 1.** Basic scheme of ECAP (a), division in blocks ( $\delta$ ) and velocity hodograph ( $\epsilon$ )

**Fig. 2.** Dependence of relative pressure (a) and summary shear ( $\delta$ ) on friction factor calculated by slip lines ( $-\circ-$ ) and rigid blocks ( $-\bullet-$ ) methods for ideally plastic material

**Fig. 3.** Dependence of relative height of a dead zone (a) and summary shear ( $\delta$ ) on friction factor for ideally plastic ( $-\bullet-$ ) and hardening ( $-\circ-$ ) material

**Fig. 4.** Dependence of ECAP pressure on friction factor calculated for copper M4