

УДК 621.7.043: 621.777.01: 53.072.22

Периг А. В.  
Голоденко Н. Н.  
Гаврильченко О. А.  
Чурилов Е. А.

### ЧИСЛЕННОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПУАНСОНА НА ЭФФЕКТ СНИЖЕНИЯ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ РОТАЦИИ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

К настоящему времени продолжается развитие методов интенсивного пластического деформирования (ИПД) применительно к обработке материалов с различными реологическими особенностями [1–4]. Наиболее стандартная геометрия штампа  $ABC-abc$  для осуществления равноканального углового прессования (РКУП) – это, так называемая, Сегаловская геометрия  $2\theta$ -штампа, когда входной канал  $AB-ba$  и выходной канал  $BC-bc$  углового штампа пересекаются под углом  $2\theta$  (рис. 1). Кроме того, у Сегаловских  $2\theta$ -штампов нет ни внешнего, ни внутреннего радиусов в точках  $B$ ;  $b$  (рис. 1) пересечения каналов [1, 3–4]. При этом в известных работах [1] не в полной мере проанализировано влияние формы деформирующего инструмента на динамические особенности вязкого течения материалов через Сегаловские  $2\theta$ -штампы в рамках применения уравнений Навье-Стокса, что и обуславливает актуальность настоящей работы. С целью интенсификации сдвиговых деформаций за каждый проход РКУП зачастую применяются схемы деформирования через остроугольные Сегаловские штампы с углами пересечения каналов  $2\theta < 90^\circ$  [1]. Но при осуществлении РКУП через штампы с  $2\theta < 90^\circ$  посредством стандартных классических прямоугольных пуансонов (4) с  $2\theta_0 = 90^\circ$  имеет место формирование больших площадей застойных зон (3) течения (рис. 1, б), а также значительное и опасное макроротационное «перемешивание»  $\Delta\alpha$  деформируемого материала (рис. 1, б, д). Простые эксперименты по физическому моделированию на рис. 1 для РКУП вязкой среды через штамп  $ABC-abc$  с острым углом пересечения каналов  $2\theta = 75^\circ$  подтверждают вышеизложенные недостатки применения стандартного прямоугольного пуансона (4) с  $2\theta_0 = 90^\circ$ . При этом в известных работах [1–4] не в полной мере проанализированы вопросы о характере влияния формы  $a'B'$  деформирующего пуансона (рис. 1) на локальные особенности установившегося течения материала заготовки через остроугольный штамп с  $2\theta < 90^\circ$ . Все вышеизложенное подчеркивает практическую важность, актуальность и научную новизну настоящей работы, посвященной плоскому гидродинамическому моделированию геометрического влияния классической (рис. 1, б) и модифицированной  $2\theta$ -наклонной (рис. 1, а, в) геометрической формы  $a'B'$  пуансона на динамику локального течения деформируемого материала.

Целью данной работы является двумерное гидродинамическое описание динамики вязкого течения несжимаемого материала заготовки через непрямоугольный Сегаловский  $2\theta$ -штамп с учетом геометрии углового штампа с углом пересечения каналов  $2\theta > 0^\circ$  и геометрической формы прямоугольного и  $2\theta$ -скошенного деформирующих пуансонов.

В качестве расчетного метода для описания динамики локального течения с учетом влияния формы  $a'B'$  пуансона (рис. 1) на динамику течения заготовки воспользуемся уравнениями Навье-Стокса. Для обозначения размерных переменных воспользуемся символами верхнего подчеркивания:  $a$ ;  $\bar{a}$  – ширина канала штампа, [м];  $\mathbf{Re}$  – число Рейнольдса;  $\bar{U}_0$  – характеристическая скорость прессования, [м/с];  $u$ ;  $\bar{u}$  –  $x$ -проекции скорости точек континуума, [м/с], где  $u = \bar{u}/\bar{U}_0$ ;  $v$ ;  $\bar{v}$  –  $y$ - проекции скорости точек среды, [м/с], где  $v = \bar{v}/\bar{U}_0$ ;  $x$ ;  $y$ ;  $\bar{x}$ ;  $\bar{y}$  –прямоугольные координаты, [м], где  $x = \bar{x}/\bar{a}$ ;  $y = \bar{y}/\bar{a}$  или  $x = \mathbf{Re} \cdot ut$ ;  $y = \mathbf{Re} \cdot vt$ ;  $\zeta$ ;  $\bar{\zeta}$  – функция вихря, [1/с], где  $\zeta = \bar{\zeta}/\bar{U}_0$ ;  $\bar{\nu}_{vis}$  – коэффициент кинематической вязкости, [м<sup>2</sup>/с];  $\bar{\eta}_{vis} = \bar{\nu}_{vis} \cdot \bar{\rho}$  – коэффициент динамической вязкости, [Па·с];  $\bar{\rho}$  – плотность деформируемого материала, [кг/м<sup>3</sup>];  $\Psi$ ;  $\bar{\psi}$  – функция тока, [м<sup>2</sup>/с], где  $\psi = \bar{\psi}/(\bar{U}_0\bar{a})$ ;  $p$ ;  $\bar{p}$  – давление

прессования при РКУП, [Па], где  $p = \bar{p}/(\bar{\rho}\bar{U}_0^2)$ ;  $t; \bar{t}$  – время, [с], где  $t = \bar{t}\bar{\eta}_{vis}/(\bar{\rho}\bar{a}^2)$  или  $t = \bar{t}\bar{v}_{vis}/(\bar{a}^2)$ ;  $Re = \bar{U}_0\bar{a}\bar{\rho}/\bar{\eta}_{vis}$  – число Рейнольдса;  $N$  – число шагов ординаты вдоль ширины канала;  $\xi; \bar{\xi}$  – горизонтальный шаг координаты вдоль оси  $x$ ;  $\eta; \bar{\eta}$  – вертикальный шаг координаты вдоль оси  $y$ ;  $\tau; \bar{\tau}$  – шаг итераций по времени, [с];  $k$  – номер итерации;  $n$  – номер шага времени;  $i; j$  – номера ячеек разностной сетки, где  $i$  соответствует оси  $x$ , и  $j$  соответствует оси  $y$ .

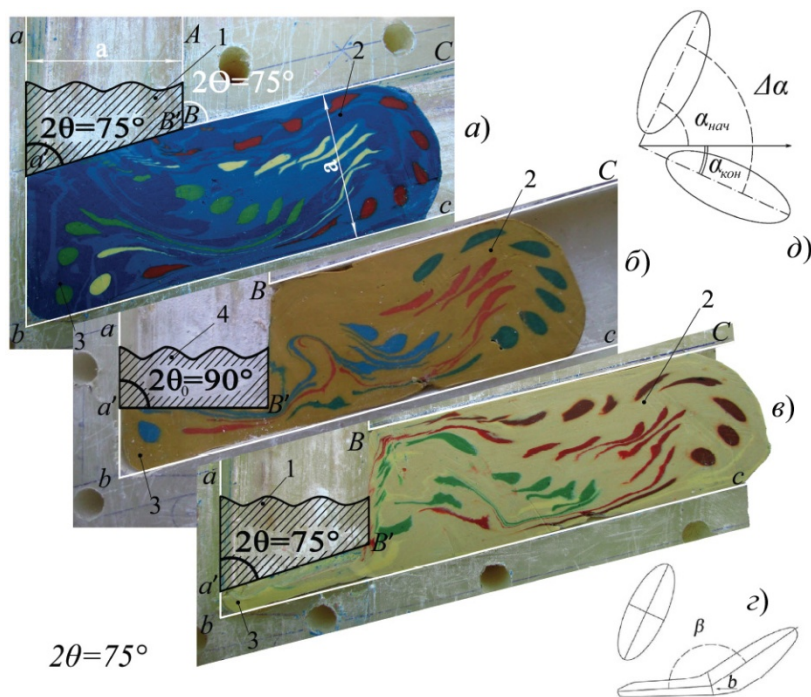


Рис. 1. Схемы РКУП, иллюстрирующие влияние формы пуансона на локальное течение сплошной среды (2) через прямоугольный штамп  $ABC-abc$  с  $2\theta = 75^\circ < 90^\circ$  (1 – модифицированная  $a'B'$  наклонная форма скошенного  $2\theta$ -пуансона; 2 – сплошная среда; 3 – экспериментально установленная форма застойной зоны; 4 – классическая прямоугольная форма  $a'B'$  пуансона с  $2\theta_0 = 90^\circ$ ), где вход материала заготовки – сверху, выход – вправо:  
 а – РКУП скошенным пуансоном (1) без выдавливания пресс-остатка; б – РКУП прямоугольным пуансоном (4) с выдавливанием пресс-остатка; в – РКУП скошенным пуансоном (1) с выдавливанием пресс-остатка; г – схема формирования неоднородности поворота; д – схема образования макроскопической ротации

Рассмотрим плоское установившееся течение сплошной среды через штампы на рис. 1. Уравнения Навье-Стокса для  $x$ - и  $y$ -проекции размерных скоростей имеют вид:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \bar{v}_{vis} \cdot \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \bar{v}_{vis} \cdot \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (2)$$

Имеем два уравнения с тремя неизвестными функциями:  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{p}$ . В качестве третьего уравнения запишем уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0. \quad (3)$$

Начальные условия для (1)–(3) несущественны, т. к. осуществляется нахождение стационарных решений системы (1)–(3). Для построения численного решения системы (1)–(3) на рис. 2–6 и так преобразуем (1)–(3), чтобы решать только одно уравнение переноса вихря (УПВ) вместо (1)–(3). Продифференцируем (1) по  $\bar{y}$  и (2) по  $\bar{x}$ . Т. о. исключается давление прессования  $\bar{p}$ . Определим размерную функцию вихря  $\bar{\zeta}$  как:

$$\bar{\zeta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}}. \quad (4)$$

Т. о. получаем следующее УПВ для размерной функции вихря  $\bar{\zeta}$ :

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}} + \bar{v}_{vis} \cdot \left( \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (5)$$

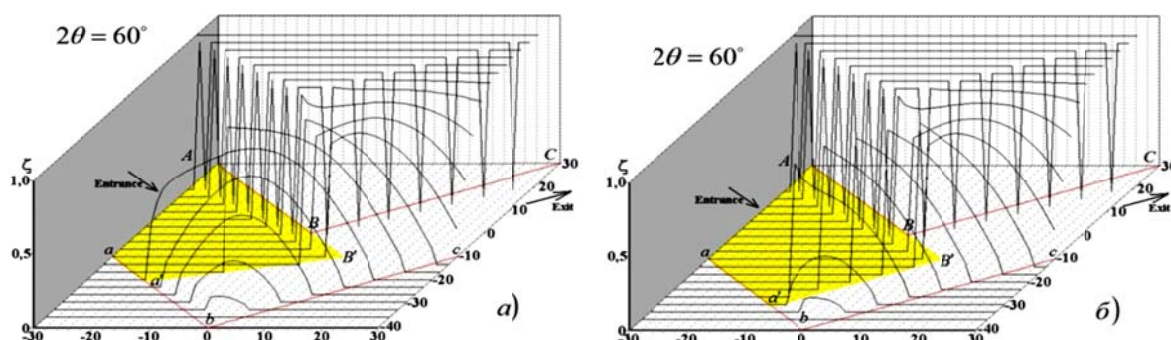


Рис. 2. Расчетные безразмерные функции вихря  $\zeta$  для штампа с углом пересечения каналов  $2\theta = 60^\circ$ , где скорость пуансона 100 мкм/с; ширина каналов штампа 35 мм, где вход материала заготовки – слева, выход – вправо:

а – РКУП прямоугольным пуансоном с  $2\theta_0 = 90^\circ$ ; б – РКУП  $2\theta$ -пуансоном с  $2\theta = 60^\circ$

Консервативная форма УПВ (5) может быть записана в виде:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\frac{\partial(\bar{u}\bar{\zeta})}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial(\bar{v}\bar{\zeta})}{\partial \bar{y}} + \bar{v}_{vis} \cdot \left( \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (6)$$

Консервативная форма (6) учитывает законы сохранения, заложенные в (1)–(3). Определим размерную функцию тока  $\bar{\psi}$  согласно следующим соотношениям:

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}} = \bar{u}; \quad \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} = -\bar{v}. \quad (7)$$

Тогда (4) для размерной функции вихря может быть записано как:

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{y}^2} = \bar{\zeta}. \quad (8)$$

Тогда УПВ (6) в безразмерных переменных примет следующий вид:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\mathbf{Re} \left( \frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right); \quad \zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (9)$$

где безразмерная функция вихря  $\zeta$  приведена на рис. 2. Уравнение (9) записывается в конечноразностной форме для последующего численного интегрирования по методу чередующихся направлений, где последовательность обхода узлов координатной сетки выбрана в виде  $i \uparrow j \uparrow; i \downarrow j \downarrow; i \uparrow j \downarrow$  и  $i \downarrow j \uparrow$ . Функцию тока  $\psi$  находим итерационным методом Ричардсона (рис. 2–6).

Рассматриваем установившийся режим локального течения заготовки (рис. 2–6). Т. о. начальные условия примем в виде грубого приближения к стационарному решению:

$$u_{i,j}^0 = 0; v_{i,j}^0 = 0; \zeta_{i,j}^0 = 0; \psi_{i,j}^0 = 0. \quad (10)$$

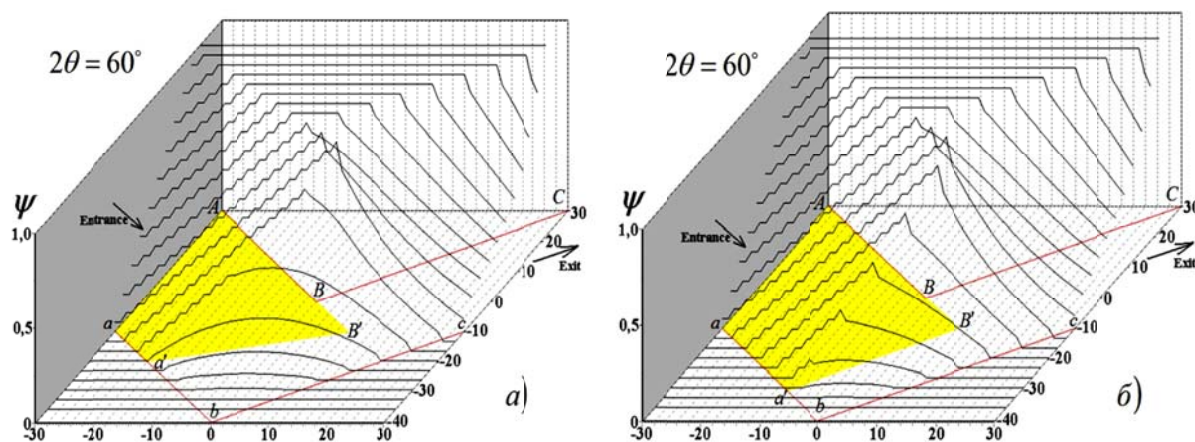


Рис. 3. Расчетные безразмерные функции тока  $\psi$  для штампа с углом пересечения каналов  $2\theta = 60^\circ$ , где скорость пуансона 100 мкм/с; ширина каналов штампа 35 мм, где вход материала заготовки – слева, выход – вправо:

а – РКУП прямоугольным пуансоном с  $2\theta_0 = 90^\circ$ ; б – РКУП  $2\theta$ -пуансоном с  $2\theta = 60^\circ$

Для численного моделирования используем наклонную стенку с углом наклона  $\theta$ , проходящую по диагонали через ячейки разностной сетки (рис. 2–6). Координатные шаги определяются как  $\bar{\xi} = \bar{a}/(N \cdot \cos \theta)$  и  $\bar{\eta} = \bar{a}/(N \cdot \sin \theta)$ . Граничные условия для стенок штампа определим из условий прилипания деформируемого материала к стенкам штампа.

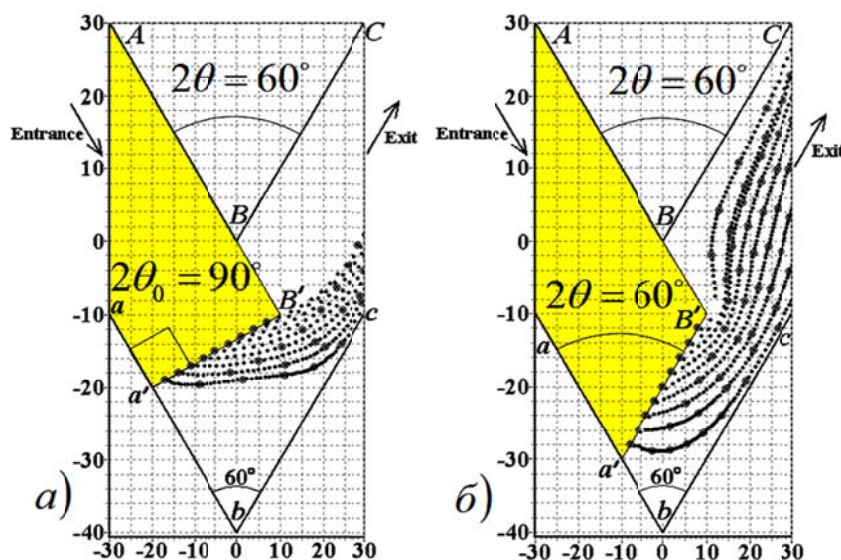


Рис. 4. Расчетные линии тока при РКУП через Сегаловский штамп с  $2\theta = 60^\circ$ , где шаги по размерным координатам составляют  $\bar{\xi} = 1010$  мкм;  $\bar{\eta} = 1750$  мкм, где вход материала заготовки – слева, выход – вправо:

а – РКУП прямоугольным пуансоном с  $2\theta_0 = 90^\circ$ , метки по времени построены для каждых 500 с; б – РКУП  $2\theta$ -пуансоном с  $2\theta = 60^\circ$ , временные метки приведены через 100 с

На внутренней левой верхней границе  $B'BC$  (рис. 2–6) имеем  $\psi_{i,j} = 1$ ;  $\zeta_{i,j} = 1$ .

На внешней нижней границе  $a'bc$  (рис. 2–6) имеем  $\psi_{i,j} = 0$ ;  $\zeta_{i,j} = 0$ .

Для фронтальной грани  $a'B'$  пуансона  $\psi_{10,-10} = 1$ ;  $\psi_{9,-11} = 1 - 2/N$ ;  $\psi_{i,j} = \psi_{i+2,j+2} - 2/N$ .

Для угловых точек, лежащих в вершинах вогнутых углов  $b$  и  $B$ , имеем  $\zeta_{i,j} = 0$ .

Для угловой точки  $B'$  выпуклого угла в разностном уравнении (9), записанном для узла (10, -11) вихрь  $\zeta_{10,-11} = 2\psi_{10,-11}$ , а в уравнении (9) для узла (11, 10) вихрь  $\zeta_{11,10} = 2\psi_{11,10}$ .

На выходе сС  $\psi_{40,j} = \psi_{40-4,j-4} - 2\psi_{40-3,j-3} + \psi_{40-1,j-1}$ ;  $\zeta_{40,j} = \zeta_{40-4,j-4} - 2\zeta_{40-3,j-3} + \zeta_{40-1,40-1}$ .

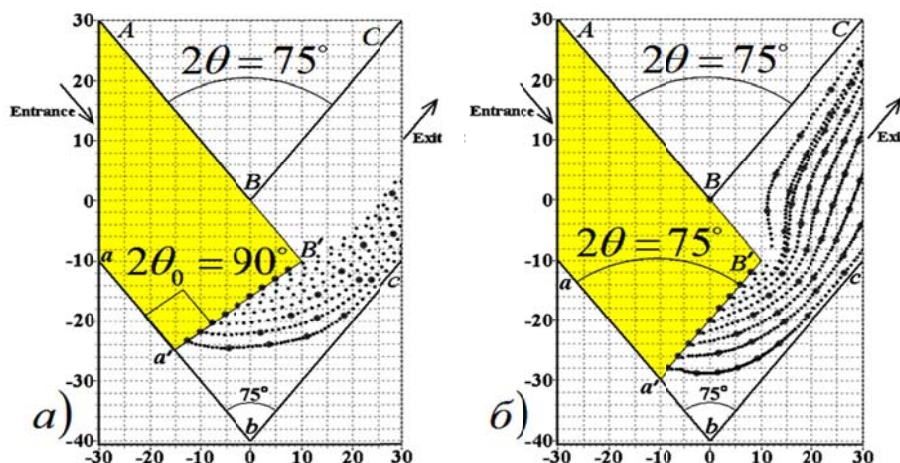


Рис. 5. Расчетные линии тока при РКУП через Сегаловский штамп с  $2\theta = 75^\circ$ , где шаги по размерным координатам составляют  $\bar{\xi} = 1103$  мкм;  $\bar{\eta} = 1437$  мкм, где вход материала заготовки – слева, выход – вправо:

а – РКУП прямоугольным пуансоном с  $2\theta_0 = 90^\circ$ , метки по времени построены для каждых 500 с; б – РКУП  $2\theta$ -пуансоном с  $2\theta = 75^\circ$ , временные метки приведены через 100 с

Численные результаты интегрирования (9) с начальными условиями (10) и вышеизложенными граничными условиями приведены на рис. 2–6 для следующих численных значений: размерная ширина входного и выходного каналов  $\bar{a} = 35$  мм; размерная длина канала  $\bar{L} = 16 \cdot \bar{a} = 0,56$  м; среднее значение размерной скорости перемещения пуансона при РКУП  $\bar{U}_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м/с; размерное время движения материала заготовки в канале штампа  $\bar{t}^* = \bar{L}/\bar{U}_0 = 5600$  с; максимальное значение безразмерного вихря  $\zeta = 1$ ; значение размерного вихря  $\bar{\zeta} = \zeta \cdot \bar{U}_0/\bar{a} = 2,86 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>; среднее значение размерной угловой скорости вращения монокристаллов медного материала  $\bar{\omega} = |\text{rot } \bar{\mathbf{w}}|/2 = \bar{\zeta}/2 = 1,43 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>; число оборотов монокристалла меди за время движения заготовки в канале углового штампа  $N^* = \bar{\omega} \bar{t}^*/2\pi = 1,27$ ; размерная плотность материала медной заготовки  $\bar{\rho} = 8960$  кг/м<sup>3</sup>; размерная удельная теплоемкость материала заготовки  $\bar{c} = 383$  Дж/(кг·К); размерная температура прессования  $\bar{t}_{temp} = 20^\circ\text{C}$ ; размерное давление РКУП заготовки  $\bar{p} = 250$  МПа; размерная динамическая вязкость вязкой ньютоновской гидродинамической модели медной заготовки при РКУП  $\bar{\eta}_{vis} = 1,6$  МПа·с; размерная кинематическая вязкость вязкой гидродинамической модели медной заготовки при РКУП  $\bar{\nu}_{vis} = \bar{\eta}_{vis}/\bar{\rho} = 179$  м<sup>2</sup>/с; число Рейнольдса вязкой ньютоновской гидродинамической модели медной заготовки при РКУП  $\text{Re} = \bar{U}_0 \bar{a} \bar{\rho}/\bar{\eta}_{vis} = \bar{U}_0 \bar{a}/\bar{\nu}_{vis} = 1,96 \cdot 10^{-8}$ ; половинное число шагов координаты вдоль  $x$ - и  $y$ - осей  $N=40$ ; число шагов координаты вдоль  $x$ - и  $y$ -осей  $2 \cdot N = 80$ ; относительная погрешность итераций  $e = 1/100$ ; размерный момент времени для построения первой изоخرоны  $\bar{t}_1 = 100$  с; размерный шаг итераций по времени  $\bar{\tau} = \bar{t}_1 = 50,13$  мкс; углы пересечения каналов в Сегаловских штампах  $2\theta = 60^\circ$  (рис. 2–4),  $2\theta = 75^\circ$  (рис. 5) и  $2\theta = 105^\circ$  (рис. 6); углы скосов деформирующих кромок  $aa'B'$  пуансонов составляют  $2\theta_0 = 90^\circ$  (прямоугольный пуансон на рис. 4, а, рис. 5, а и рис. 6, а),  $2\theta = 60^\circ$  (остроугольный скошенный пуансон на рис. 4, б),  $2\theta = 75^\circ$  (наклонная кромка скошенного пуансона на рис. 5, б)

и  $2\theta = 105^\circ$  (тупоугольный скос пуансона на рис. 6, б); размерные горизонтальные и вертикальные шаги координаты вдоль  $x$ - и  $y$ -осей составляют  $\bar{\xi} = 1010$  мкм и  $\bar{\eta} = 1750$  мкм для углового штампа с  $2\theta = 60^\circ$  (рис. 2–4);  $\bar{\xi} = 1103$  мкм и  $\bar{\eta} = 1437$  мкм для штампа с  $2\theta = 75^\circ$  (рис. 5);  $\bar{\xi} = 1437$  мкм и  $\bar{\eta} = 1103$  мкм для углового штампа с  $2\theta = 105^\circ$  (рис. 6).

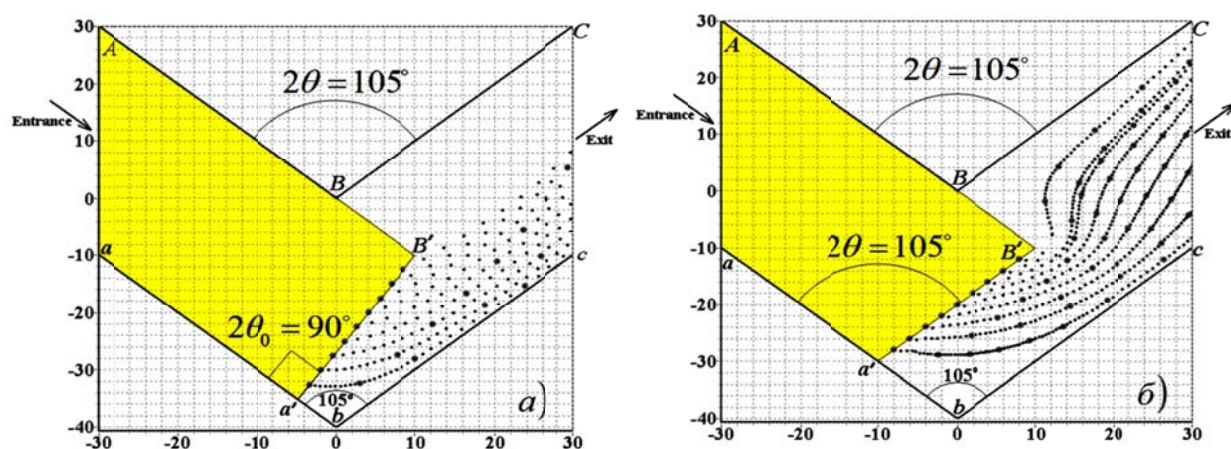


Рис. 6. Расчетные линии тока при РКУП через Сегаловский штамп с  $2\theta = 105^\circ$ , где шаги по размерным координатам составляют  $\bar{\xi} = 1437$  мкм;  $\bar{\eta} = 1103$  мкм, где вход материала заготовки – слева, выход – вправо:

а – РКУП прямоугольным пуансоном с  $2\theta_0 = 90^\circ$ , метки по времени построены для каждых 500 с; б – РКУП  $2\theta$ -пуансоном с  $2\theta = 105^\circ$ , временные метки приведены через 100 с

Неустойчивости численного решения, зарождающиеся на выходных границах  $cC$  (рис. 2–6), распространяются вверх по потоку.

Численное решение (рис. 5) для РКУП материала через штамп с  $2\theta = 75^\circ$  даёт результаты, удовлетворительно согласующиеся с физическим экспериментом (рис. 1), лишь в том случае, когда выход  $cC$  потока находится достаточно далеко от биссектрисы  $bB$  зоны пересечения каналов штампа. Т. е. в идеале для гидродинамического решения расстояние между сечениями  $bB$  и  $cC$  должно быть бесконечно большим. Поэтому на численных графиках на рис. 2–6 были отброшены ячейки разностных сеток возле выходных линий  $cC$  при  $i > 30$ . Технологическая задача, рассмотренная в настоящей работе, имеет промышленную важность для совершенствования процессов ИПД при РКУП. При этом применение численного гидродинамического моделирования позволяет дать толкование результатам физического моделирования на рис. 1. Как следует из уравнений (7) и рис. 3, частные производные безразмерной функции тока  $\psi$  определяют проекции скорости потока:  $\partial\psi/\partial y = u$ ;  $\partial\psi/\partial x = (-v)$ . На пространственной диаграмме для функции тока  $\psi$  на рис. 3 возле угла  $b$  штампа с прямоугольными картезианскими координатами  $(0, -40)$  наблюдается геометрическое влияние формы пуансона  $aa'B'A$  на размер застойной зоны  $a'B'b$ . В случае применения прямоугольного пуансона с  $2\theta_0 = 90^\circ$  на рис. 3, а и на рис. 4, а наблюдается большая застойная зона  $a'B'b$  с нулевым значением функции тока  $\psi = 0$  и нулевыми значениями скоростей течения  $u = 0$ ;  $v = 0$ . Однако в случае применения наклонного скошенного  $2\theta$ -пуансона на рис. 3, б и на рис. 4, б имеет место формирование меньшей застойной зоны  $a'B'b$ . Согласно определению, линии тока – это линии, для которых функция тока  $\psi$  является величиной постоянной  $\psi = const$ . Рассчитанный эффект на рис. 3 показывает отсутствие «пилообразной» формы на пространственном контуре  $\psi$ -функции над зоной штампа  $a'B'b$  и тем самым подтверждает, что зона штампа  $a'B'b$  представляет собой именно застойную зону течения. Пространственные расчетные эпюры для  $\zeta$ -функции на рис. 2 показывают, что функция вихря  $\zeta = 0$  имеет нулевое значение над застойной зоной  $a'B'b$  штампа. Фактически поликристаллический материал представляет собой естественный композит, состоящий из мельчайших монокристаллов и аморфной вязкой «связки» между ними, обеспечивающей связывание таких монокристаллов.

При ИПД ламинарно-текущие слои такой аморфной связки движутся с различными скоростями наряду со сторонами монокристаллов материала, погруженными в слои связки. Фактически вихрь  $\zeta$  (9) характеризует относительное вращение монокристалла материала при линейном перемещении слоев связки вдоль линий тока на рис. 4–6. В результате внутреннего трения контактирующие поверхности монокристаллов становятся более «гладкими» подобно тому, как выглаживается речная и морская галька под действием вязкого потока. Но в окрестности застойной зоны  $a'B'b$  вихрь  $\zeta$  равен нулю, т. е. в данной области штампа не происходит сглаживания поверхностей монокристаллов и, следовательно, в застойной зоне  $a'B'b$  не происходит улучшения пластичности материала заготовки. Предложенное гидродинамическое истолкование экспериментальных результатов на рис. 1 расширяет представления о характере влияния формы пуансона на особенности локального течения материала при РКУП через непрямоугольный Сегаловский  $2\theta$ -штамп.

### ВЫВОДЫ

Приведено решение задачи о минимизации отходов при локальном течении заготовок при РКУП через  $2\theta$ -штампы с  $2\theta < 90^\circ$  посредством численного решения краевой задачи (9) для УПВ с учетом прямоугольной ( $2\theta_0 = 90^\circ$ ) и  $2\theta$ -скошенной форм пуансона. Результаты как физического (рис. 1, б), так и гидродинамического (рис. 2, а, 3, а, 4, а, 5, а, 6, а) моделирования показывают, что применение прямоугольных пуансонов с  $2\theta_0 = 90^\circ$  для РКУП заготовок через  $2\theta$ -штампы с  $2\theta < 90^\circ$  является нежелательным ввиду формирования больших площадей  $a'B'b$  застойных зон в окрестностях внешних углов  $2\theta = (abc)$  штампов.

Как физическое (рис. 1, а, рис. 1, в), так и гидродинамическое (рис. 2, б, 3, б, 4, б, 5, б, 6, б) моделирование показывают, что применение скошенного наклонного  $2\theta$ -пуансона с  $a'B' || bc$  для РКУП заготовок через  $2\theta$ -штампы с  $2\theta < 90^\circ$  является весьма перспективным методом ИПД при РКУП за счет минимизации площадей  $a'B'b$  застойных зон и снижения отходов материала в окрестностях внешних углов  $2\theta = (abc)$  штампов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Периг А. В. О снижении макроскопической ротации при равноканальном угловом прессовании материалов / А. В. Периг, С. Н. Романко, Л. Л. Розанов // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 154–160. – Библиогр.: с. 160. – ISSN 2076-2151.*
2. 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. – Библиогр.: с. 29. – ISSN 2076-2151.*
3. Численное моделирование формирования макроскопической ротации при равноканальном многоугловом прессовании / А. В. Периг, Н. Н. Голоденко, Я. Г. Жбанков, И. И. Бойко, И. А. Матвеев // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 24–30.*
4. Компьютерное моделирование течения материалов при равноканальном угловом прессовании: анализ движения вязкой среды и экспериментальная верификация методом маркеров / А. В. Периг, А. М. Лаптев, Н. Н. Голоденко, А. Ю. Лошманов, М. Г. Литвинов // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 57–62. – Библиогр.: с. 62. – ISBN 978-966-379-325-2.*

Периг А. В. – канд. техн. наук, доц. каф. АПП ДГМА;  
Голоденко Н. Н. – канд. физ.-мат. наук, доц. ДонНАСА;  
Гаврильченко О. А. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ПТМ ДГМА;  
Чурилов Е. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ДонНАСА – Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка.

E-mail: olexander.perig@gmail.com; alex\_victor\_perig@hotmail.com

Статья поступила в редакцию 05.03.2013 г.