

УДК 621.7.043: 621.77: 621.777.01: 53.072.22: 532.5.01: 539.381: 539.89

Периг А. В.  
Голоденко Н. Н.  
Жбанков Я. Г.  
Бойко И. И.  
Матвеев И. А.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ РОТАЦИИ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ МНОГОУГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ

К настоящему времени процессы равноканального многоугольного прессования (РКМУП) представляют собой новые деформационные методы интенсивного пластического деформирования (ИПД) металлов [1–4], композитов [5] и полимерных полуфабрикатов [6–7]. Технологически процессы РКМУП реализуются продавливанием обрабатываемых заготовок через штампы, содержащие несколько пар каналов одинакового поперечного сечения, пересекающихся под заданными углами [1–7]. Технологические возможности и основные преимущества процессов РКМУП при ИПД материалов подробно рассмотрены в ряде работ Варюхина В. Н. и др. [1], Спусканюка В. З. и др. [2], Rosochowski A. и др. [3], Kim H. S. [4], а также Белошенко В. А. и др. [5–7]. К преимуществам РКМУП относятся возможность продавливания более длинных заготовок через многоугольные штампы, уменьшение влияния краевого эффекта на неравномерность распределения деформаций [8], снижение прерывности процесса [9], а также накоплении больших сдвиговых деформаций в объеме заготовки за один проход деформирования. При этом дальнейшее совершенствование процессов РКМУП в работах [1–7] однозначно связывается с увеличением числа пар пересекающихся каналов. С другой стороны, увеличение количества пар пересекающихся каналов в штампах для РКМУП существенно снижает подвижность деформируемой заготовки, повышает неравномерность распределения деформаций материала по длине многоугольного канала, а также обуславливает формирование значительных градиентов скоростей течения и касательных напряжений в объеме заготовки [9–11, 14]. В результате при пластическом течении заготовки в штампе для РКМУП имеет место формирование опасных сечений, в которых имеет место исчерпание ресурса пластичности материала, повышается вероятность формирования трещин и, следовательно, возникает опасность разрушения деформируемой заготовки [15]. На уровне проектирования штамповой оснастки, решение проектно-конструкторских задач для обеспечения реализации РКМУП требует тщательного сопряжения и достаточного крепления всех частей разъемного многоугольного штампа по всей длине многоугольного канала как во избежание потерь деформируемого материала в виде облоя, так и с целью предотвращения раскрытия штампа при реализации процесса РКМУП. Также отметим, что важнейшим показателем степени сдвиговой проработки заготовок при ИПД является величина макроскопической ротации деформируемого материала [10–14]. С учетом всего вышеизложенного приходим к выводу, что практическая реализация технологии РКМУП заготовок требует подробного динамического анализа особенностей течения деформируемых материалов с учетом эффектов вязкости и макроскопической ротации. В тоже время в ранее опубликованных работах [1–15] не в полной мере изучен характер распределения макроскопической ротации в объеме заготовок при РКМУП, что и обуславливает актуальность настоящего исследования.

Существенно, что протекание процесса РКМУП через двухповоротный штамп с  $2\theta = 90^\circ$  (рис. 1) характеризуется как существенным влиянием особенностей течения обрабатываемого материала на геометрические, кинематические и силовые характеристики течения, так и значительными неравномерностью и неоднородностью деформированного состояния заготовки. С кинематической точки зрения указанные факторы обуславливают как формирование застойных зон в окрестностях т. *F*, т. *C* и т. *H* (рис. 1), так и образование значительного макроротора в зоне (*BCD-HGF*) деформируемой заготовки. Это приводит к уменьшению длин участков стационарного течения и, как результат, к снижению коэффициента

использования материала и потере технологической эффективности процесса РКМУП (рис. 1). При этом следует отметить большую математическую сложность описания динамики формирования макроскопической ротации при РКМУП с использованием классических методов теории пластичности. Отмеченные факты указывают на необходимость развития математических моделей, обеспечивающих комплексное описание течения материалов при РКМУП с учетом формирования зон макроскопической ротации, что определяет актуальность задачи, решению которой посвящена данная работа.

Основные геометрические особенности течения материалов при РКМУП можно проанализировать с использованием геометрических методов исходных кольцевых сеток, причём динамическое описание макроскопической ротации допустимо в рамках решения краевых задач для уравнений Навье-Стокса и переноса вихря [10–14]. При этом в известных ранее публикациях [1–15] не вполне изучены вопросы динамики формирования макроротатора при РКМУП материалов в двухповоротных штампах с  $2\theta = 90^\circ$  (рис. 1). Резюмируя все вышеизложенное, можно сформулировать задачи настоящего исследования.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное описание динамики формирования макроротатора в объёме деформируемой заготовки при её локальном течении в многоугловом двухповоротном штампе с  $2\theta = 90^\circ$  (рис. 1). Разрабатываемая математическая модель задачи также должна обеспечить корректный учет влияния входного и выходного каналов многоугольного штампа на кинематические особенности течения материала.

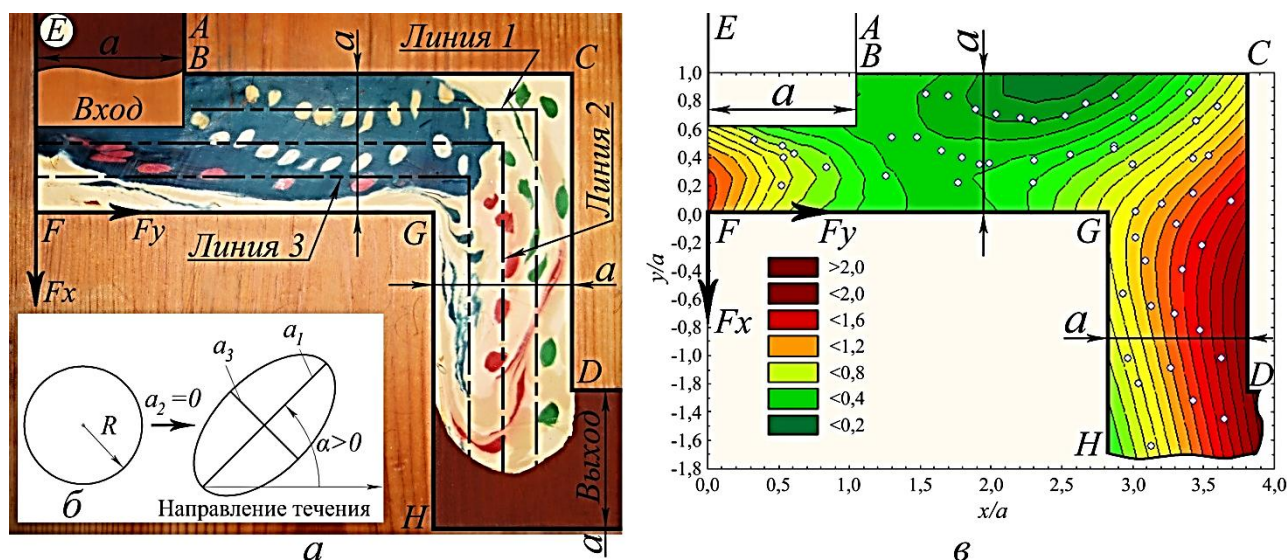


Рис. 1. Физическая модель заготовки с исходной кольцевой сеткой (а), схема трансформации исходной окружности кольцевой сетки в эллипс (б), а также соответствующая экспериментальная эпюра поля интенсивностей логарифмических деформаций (в) при РКМУП через двухповоротный штамп с  $2\theta = 90^\circ$ , где пунктирные линии 1 – 3 соответствуют исходным столбцам начальной кольцевой делительной сетки

Экспериментально-теоретический анализ формирования макроскопической ротации в объёме деформируемого материала при РКМУП возможен в рамках физического моделирования с применением методов исходных кольцевых сеток [10–14]. Для этого была изготовлена физическая модель двухповоротного разъемного штампа с шириной каналов  $a = 40$  мм и углами  $2\theta = 90^\circ$  в т. В и т. F между входным (ABEF) и переходным (BCFG) каналами, а также в т. С и т. G между переходным (BCFG) и выходным (CDGH) каналами (рис. 1). Исходная кольцевая сетка формировалась сверлением сквозных отверстий диаметрами 4 мм в замороженной модели заготовки, которые заполнялись размягченным одноцветным материалом вдоль каждой из линий 1–3 на рис. 1, а, причём масштаб исходной сетки выбирался из условия расположения 3-х исходных маркеров на ширине модели заготовки. Измерением максимальных  $a_1$  и минимальных  $a_3$  линейных размеров эллиптических фигур, в которые трансформировались исходные цилиндрические вставки (рис. 1, б), было рассчитано

поле интенсивностей логарифмических деформаций (рис. 1, в). Анализ экспериментальных результатов на рис. 1, в показывает, что на переходном участке (*BCFG*) интенсивность деформаций  $\langle e_i \rangle_{BCFG} = 0,42$ , а наибольшая средняя интенсивность наблюдается в зоне (*CDGH*) выходного канала  $\langle e_i \rangle_{CDGH} = 0,58$  (рис. 1, в), причем для маркеров на линиях 1, 2 и 3 значения  $\langle e_i \rangle$  составляют 0,42; 0,43 и 0,66 соответственно.

Для оценки макроскопической ротации воспользуемся разложением тензора пластической дисторсии  $\beta_{ij}$  на симметричную  $\varepsilon_{ij}$  и антисимметричную  $\omega_{ij}$  части:  $\beta_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij}$ , где  $\varepsilon_{ij}$  определяет деформацию в некотором выделенном объеме заготовки, а  $\omega_{ij}$  – чистый поворот среды как единого целого [13, 16–17]. В работе [16] вектор пластического поворота определяется как  $\Omega_i = (1/2) \cdot e_{ijk} \omega_{jk}$ , где  $e_{ijk}$  – тензор Леви-Чивиты. Введем в рассмотрение углы  $\alpha_i$  наклонов больших осей эллиптических маркеров к направлению течения (рис. 1, б). Поскольку измеряемые углы  $\alpha_i$  характеризуют наличие поворотных мод при ИПД, то существует соответствие между углами  $\alpha_i$  и модулями интегральных величин  $|\int \Omega_i dt|$ , т. е.  $\alpha_i \sim |\int \Omega_i dt|$ . Т. о. можно утверждать, что углы  $\alpha_i$  на рис. 1, а–б определяют локальный угол поворота главных осей течения (рис. 2, а). Так, на рис. 2, а средние значения модуля угла  $\alpha$  составляют  $\langle |\alpha| \rangle = 1,15; 0,81; 0,63$  для линий 1, 2 и 3 соответственно.

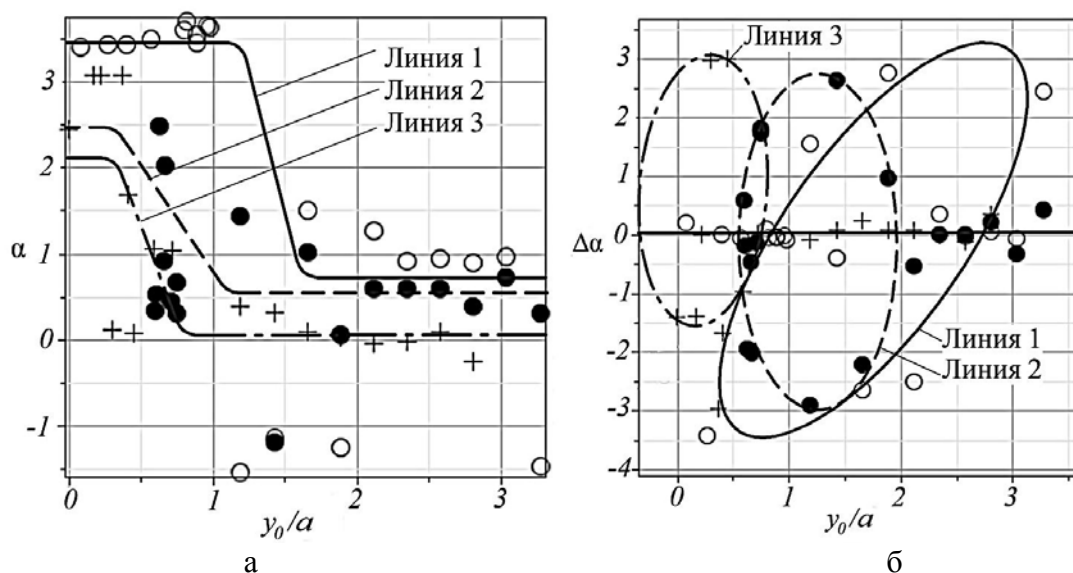


Рис. 2. Изменение угла  $\alpha$  (а) и приращение угла  $\Delta\alpha$  (б) большой оси эллиптического маркера с направлением течения в зависимости от исходной вертикальной координаты узлов кольцевой сетки  $y_0/a$ , где  $\circ\circ\circ$ ,  $\bullet\bullet\bullet$ ,  $+++$  – точки линий 1, 2 и 3 соответственно

Под макроскопической ротацией  $\Delta\alpha$ , характеризующей степень «перемешивания» материала в объеме заготовки (рис. 1, а), будем понимать приращение угла  $\alpha$  (рис. 1, б) для двух последовательных положений эллиптического маркера  $\Delta\alpha = \alpha_j - \alpha_{j-1}$  на одной из линий 1–3 (рис. 2, б). По мере течения заготовки в зоне (*BCDHGF*) штампа (рис. 1, а), материал проходит путь  $4,9 \cdot a$ , сопоставимый с общей длиной участков переходного (*BCFG*) и выходного (*CDGH*) каналов  $L_{FG} + L_{GH} = 5,32 \cdot a$ , что позволяет не только сформироваться (рис. 2, а), но и замкнуться ротационным петлям на рис. 2, б. При этом площади замкнутых ротационных контуров, соответствующих линиям 1–3, обратно пропорциональны мощностям ротаций материала в окрестностях данных линий, причем на рис. 2, б соотношения площадей ротационных петель составляют  $S_1:S_2:S_3 = 1:0,55:0,38$  для линий 1, 2 и 3 соответственно.

Для математического описания наблюдаемой макроскопической ротации на рис. 2 рассмотрим локальное вязкое течение мягкого материала деформируемой физической модели заготовки в угловом штампе на рис. 1. Для рассматриваемой задачи запишем уравнения Навье-Стокса [10–11, 14]. Если используются размерное и безразмерное значения величины, то размерная величина выделяется верхним подчеркиванием:  $a$ ,  $\bar{a}$  – ширина каждого из каналов штампа, [м];  $\mathbf{Re}$  – число Рейнольдса;  $t$ ,  $\bar{t}$  – время, [с];  $\bar{U}_0$  – характерная скорость

прессования, [м/с];  $u, \bar{u}$  –  $x$ -проекция скорости, [м/с];  $v, \bar{v}$  –  $y$ -проекция скорости, [м/с];  $x, y, \bar{x}, \bar{y}$  – декартовы координаты, [м];  $\zeta, \bar{\zeta}$  – вихрь, [1/с];  $\eta, \bar{\eta}$  – шаг вдоль оси  $x$ ;  $\bar{v}_{vis}$  – кинематическая вязкость, [м<sup>2</sup>/с];  $\bar{\eta}_{vis}$  – динамическая вязкость, [Па·с];  $\xi, \bar{\xi}$  – шаг вдоль оси  $y$ ;  $\bar{\rho}$  – плотность вязкого материала, [кг/м<sup>3</sup>];  $\bar{\tau}$  – шаг итераций по времени, [с];  $\psi, \bar{\psi}$  – функция тока, [м<sup>2</sup>/с]. Индексы:  $i, j$  – номера ячеек по горизонтали и по вертикали.

Уравнение Навье–Стокса примет следующий вид:

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

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

Имеем два уравнения с тремя неизвестными  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  и давлением прессования  $\bar{p}$ . Чтобы замкнуть систему, к соотношениям (1)–(2) присоединяем уравнение неразрывности:

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

Начальные условия не имеют принципиального значения, поскольку при решении данной задачи РКМУП (рис. 1, а) ищется стационарное решение (рис. 3–4) задачи (1)–(3).

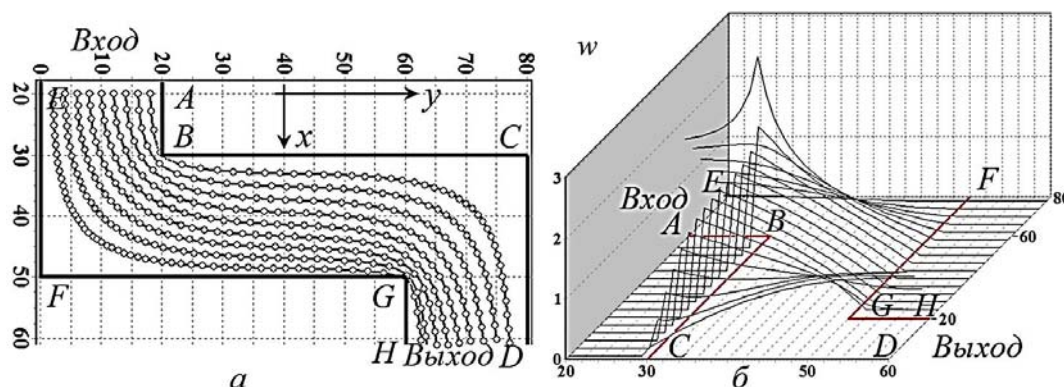


Рис. 3. Расчетные линии тока с соответствующими изохронами (а), где начальные точки взяты на расстоянии 20 шагов координаты от входа  $AE$  с одинаковым шагом вдоль оси  $y$ , ширина канала 40 мм, метки времени выбраны через 50 с, а также поле полной скорости  $w = (u^2 + v^2)^{0.5}$  (б), где вход ( $AE$ ) – сверху (а) и слева (б), а выход ( $DH$ ) – вниз (а) и вправо (б)

Продифференцировав (1) по  $\bar{y}$  и (2) по  $\bar{x}$ , исключив давление и определив вихрь как:

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

получим уравнение переноса вихря:

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

Уравнение (5) в консервативной форме принимает следующий вид:

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

Соотношение (6) обеспечивает выполнение интегральных законов сохранения, справедливых для исходных уравнений (1)–(3), и записывается в конечно-разностном виде.

Определяя функцию тока  $\bar{\psi}$  (рис. 4) по формулам:

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

уравнение (4) записываем в форме дифференциального уравнения второго порядка:

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

Введя безразмерные величины  $u = \bar{u} / \bar{U}_0$ ;  $v = \bar{v} / \bar{U}_0$ ;  $x = \bar{x} / \bar{a}$ ;  $y = \bar{y} / \bar{a}$ ;  $\zeta = \bar{\zeta} \bar{a} / \bar{U}_0$ ;  $t = \bar{t} \bar{U}_0 / \bar{a}$ , приведем уравнения (6) и (4) к безразмерному виду:

$$\partial \zeta / \partial t = -\operatorname{Re}((\partial(u\zeta) / \partial x) + (\partial(v\zeta) / \partial y)) + ((\partial^2 \zeta / \partial x^2) + (\partial^2 \zeta / \partial y^2)); \quad (9)$$

$$\zeta = \partial u / \partial y - \partial v / \partial x. \quad (10)$$

После записи уравнения (9) в конечных разностях функцию тока  $\psi$  находим итерационным методом Ричардсона (рис. 1, б). Для численного решения краевой задачи (9)–(10) воспользуемся итерационным процессом метода Гаусса–Зейделя, при котором направление обхода узлов координатной конечноразностной сетки циклически изменяется.

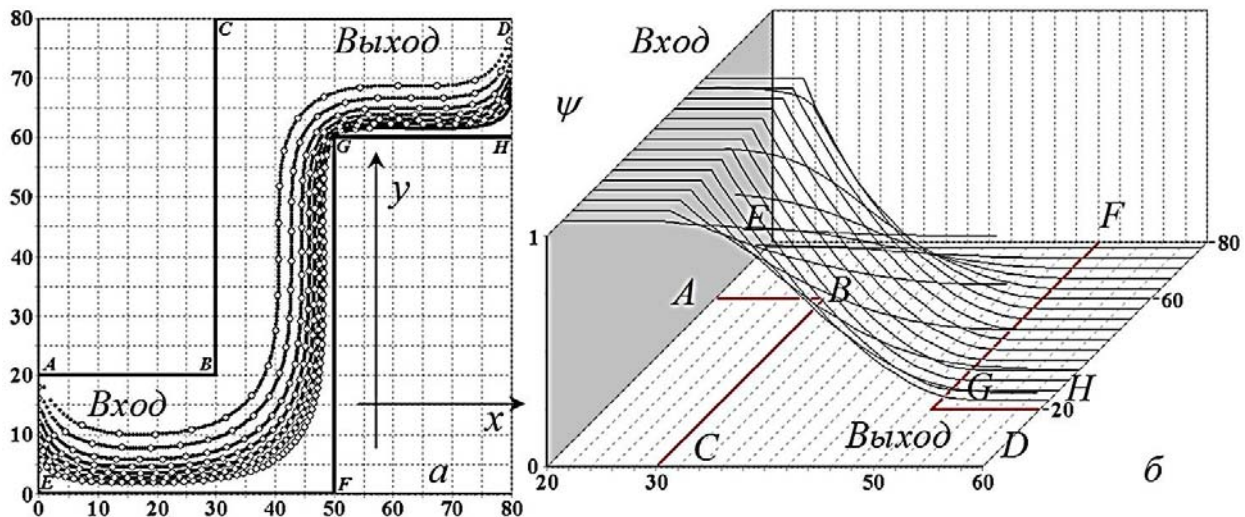


Рис. 4. Расчетные линии тока с соответствующими изохронами при РКМУП (а), где начальные точки взяты на входе (AE) с одинаковым шагом вдоль оси  $y$  и пространственное поле функции тока  $\psi$  (б); вход (AE) – слева, а выход (DH) – вправо

Начальные условия для краевой задачи (9)–(10) принимаем в виде приближения к стационарному решению:  $u^0_{i,j} = 0$ ;  $v^0_{i,j} = 0$ ;  $\zeta^0_{i,j} = 0$ ;  $\psi^0_{i,j} = 0$ . Граничные условия для стенок штампа запишем как условия для полного прилипания вязкого материала (рис. 1, 3–4).

Для границы (ABCD) потока  $\psi_{i,j} = 0$ ; для границы (EFGH) потока  $\psi_{i,j} = 1$ ; для участков (AB) и (CD) имеем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ ; для участка (BC) имеем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}) / \zeta^2$ ; для участков (EF) и (GH) записываем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ ; для участка (FG) имеем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}) / \zeta^2$ ; для угловых точек, лежащих в вершинах «вогнутых» углов C и F,  $\zeta_{i,j} = 0$ ; для угловой точки B в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j - 1)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j-1}) / \eta^2$ ; а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i + 1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i+1,j}) / \zeta^2$ ; для угловой точки G в разностном уравнении, записанном для узла  $(i - 1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i-1,j}) / \zeta^2$ , а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j + 1)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j+1}) / \zeta^2$ ; на входе (AE):  $\psi_{0,j} = \psi_{1,j}$ ;  $u_{0,j} = 1$ ;  $v_{0,j} = 0$ ; на выходе (DH):  $\psi_{n,j} = \psi_{n-4,j} - 2\psi_{n-3,j} + \psi_{n-1,j}$ ;  $\zeta_{n,j} = \zeta_{n-4,j} - 2\zeta_{n-3,j} + \zeta_{n-1,j}$ ;  $v_{n,j} = 0$  (рис. 1, 3–4).

Численный расчет проводился для следующих значений параметров: ширина каждого канала  $\bar{a} = 40$  мм, скорость прессования  $\bar{U}_0 = 270 \cdot 10^{-6}$  м/с, давление прессования  $\bar{p} = 518$  кПа, плотность модели  $\bar{\rho} = 1850$  кг/м<sup>3</sup>, предел текучести пластилина  $\bar{\sigma}_S = 217$  кПа [18], удельные теплоемкость и теплопроводность пластилина  $\bar{c} = 1,004$  кДж/(кг·К) [19] и  $\bar{\lambda} = 0,7$  Дж/(м·с·К) [19]; динамическая вязкость  $\bar{\eta}_{vis} = 135$  Па·с, число Рейнольдса  $\operatorname{Re} = \bar{U}_0 \bar{a} / \bar{v}_{vis} = 1,48 \cdot 10^{-4}$ ,  $\bar{\tau} = 74$  мс, кинематическая вязкость  $\bar{v}_{vis} = \bar{\eta}_{vis} / \bar{\rho} = 0,073$  м<sup>2</sup>/с, число шагов координатной сетки вдоль оси  $x$  – 80, вдоль оси  $y$  – 100, шаг координаты 2 мм, относительная погрешность итераций 0,001. На рис. 3, а, 4, а показаны расчетные линии тока, на рис. 4, б – функция тока  $\psi$ , а на рис. 3, б – пространственное поле полной скорости  $w = (u^2 + v^2)^{0,5}$  вязкого потока.

Проанализируем расчетные линии тока на рис. 3, а и 4, а. Неустойчивости численного решения, зарождающиеся на входной границе ( $AE$ ) штампа, распространяются по направлению прессования, т. е. «вниз по потоку», а неустойчивости, зарождающиеся на выходной границе ( $DH$ ) движутся навстречу к направлению течения материала, т. е. «вверх по потоку». Численное решение (рис. 3, 4) даёт результаты, согласующиеся с физическим экспериментом (рис. 1, 2), лишь в том случае, когда вход ( $AE$ ) и выход ( $DH$ ) потока находятся достаточно далеко от интересующей нас области ( $BCFG$ ) переходного канала штампа, в идеале на бесконечности. На рис. 4, а показаны расчетные линии тока, получаемые при условии, что начальные точки взяты на входе с одинаковым шагом  $a/10$  вдоль оси  $y$ . Из-за искажений, вызванных неустойчивостями на входе ( $AE$ ), эти линии тока прижимаются к стенке ( $EFGH$ ), а линии тока, лежащие ближе к стенке ( $ABCD$ ), выпадают из поля зрения. На рис. 3, а показаны линии тока, получаемые при условии, что начальные точки взяты не у границы координатной сетки, соответствующей входу ( $AE$ ) вязкого потока ( $i = 0$ ), а на удалении 20 ячеек от неё, так же с одинаковым шагом  $a/10$  вдоль оси  $y$ . Аналогично были обрезаны расчётные линии тока на расстоянии 20 ячеек от границы конечноразностной сетки, соответствующей выходу ( $DH$ ) потока ( $i = 80$ ), чтобы в поле зрения не попадали расчетные искажения, вызванные неустойчивостями на выходе ( $DH$ ).

В рамках физического моделирования течения материала при РКМУП (рис. 1, а) было установлено, что в объеме мягкой модели заготовки, расположенном в окрестности линии 1, прилегающей к стенке ( $ABCD$ ) штампа, имеет место наибольшее значение  $\langle \alpha \rangle = 1,15$  рад для величины локального угла поворота главных осей течения (рис. 2, а). Расчетное поле модуля скорости вязкого потока  $w = (u^2 + v^2)^{0,5}$  на рис. 3, б также обнаруживает всплески на пространственном графике  $w$  в окрестности стенки ( $ABCD$ ) штампа, к которой прилегает линия 1 (рис. 1, а, 2). Указанное согласование результатов физического и математического моделирования свидетельствует о формировании значительных градиентов полной скорости потока в объеме деформируемого материала. Всплеск величины  $w$  на рис. 3, б обуславливает относительное вращательное движение частиц сплошной среды, что подтверждается формированием поворотных мод деформации (рис. 1, а, 2), высокую неравномерность деформаций в объеме материала, а также интенсивную макроскопическую ротацию в ( $BCFG$ ) переходного канала штампа при осуществлении РКМУП.

## ВЫВОДЫ

С применением экспериментального метода исходных кольцевых сеток и численного теоретического метода конечных разностей выполнено описание динамики формирования макроротора в объеме деформируемой заготовки при её локальном течении в многоугловом двухповоротном штампе с  $2\theta = 90^\circ$ . Физическое моделирование макроротора основывалось на пропорциональности величин вектора пластического поворота и локального угла поворота главных осей течения. Численное моделирование макроротора при течении сплошной среды основывалось на пропорциональности модулей вектора полной скорости и градиента скорости течения. Совместное применение экспериментально-теоретических методов анализа позволило установить формирование опасной зоны в деформируемом материале заготовки, который течет в окрестности стенки ( $ABCD$ ) многоугольного штампа.

Предложен и реализован численный гидродинамический подход к анализу вязкого течения аморфного материала при РКМУП через двухповоротный штамп, основанный на численном конечноразностном решении краевых задач для уравнений Навье-Стокса в форме уравнений переноса вихря. Разработанный алгоритм описывает установившиеся плоские течения вязких несжимаемых ньютоновских жидкостей в многоугольных штампах, а также корректно учитывает влияние входного и выходного каналов штампа.

Применение исходных кольцевых сеток к анализу задач РКМУП материала через многоугольной сегалов штамп подтвердило наличие поворотных мод деформации, а также позволило проиллюстрировать динамику формирования макроскопической ротации в объеме деформируемой заготовки посредством построения графических зависимостей для  $\alpha = \alpha(y_0/a)$  и замкнутых ротационных петель на плоскости ( $\Delta\alpha; y_0/a$ ).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Равноканальная многоугольная экструзия / В. Н. Варюхин, В. З. Спусканыук, Н. И. Матросов, А. Б. Дугаюк и др. // *Физика и техника высоких давлений.* – 2002. – № 12 (4). – С. 31–39.
2. Spuskanyuk V. Development of the equal-channel angular hydroextrusion / V. Spuskanyuk, A. Spuskanyuk, V. Varyukhin // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2008. – Vol. 203. – N 1–3. – P. 305–309.
3. Rosochowski A. Numerical and physical modelling of plastic deformation in 2-turn ECAE / A. Rosochowski, L. Olejnik // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2002. – Vol. 125–126. – P. 309–316.
4. Kim H. S. Finite element analysis of deformation behavior of metals during equal-channel multi-angular pressing / H. S. Kim // *Materials Science and Engineering: A.* – 2002. – Vol. 328. – N 1–2. – P. 317–323.
5. Белошенко В. А. Равноканальное многоугольное прессование многоволокнутого сверхпроводящего композита / В. А. Белошенко, Н. И. Матросов и др. // *Физика и техника выс. давл.* – 2009. – № 19 (2). – С. 129–134.
6. Твердофазная экструзия полиамида, осуществляемая при простом сдвиге / В. А. Белошенко, А. В. Возняк [и др.] // *Высокомолекулярные соединения.* – 2009. – № 51 (8). – С. 1473–1480. – (Серия «А»).
7. Новые методы твердофазной модификации полимеров, основанные на деформации простым сдвигом / В. А. Белошенко, В. Н. Варюхин [и др.] // *Доклады Академии наук.* – 2009. – № 426 (1). – С. 56–58.
8. 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 : зб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28).* – С. 16–22.
9. Численное моделирование процесса равноканального многоугольного прессования / А. В. Периг, С. А. Короткий, А. М. Лаптев [и др.] // *Збірник наукових праць ПНТУ ім. Ю. Кондратюка.* – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – Вип. 3 (25), т. 2. – С. 159–163. – (Серия «Галузеве машинобудування, будівництво»).
10. Численное моделирование вязкого течения материала при равноканальном угловом прессовании через штамп с параллельными скосами / А. В. Периг, С. В. Подлесный, Н. Н. Голоденко [и др.] // *Обработка материалов давлением : зб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27).* – С. 23–29.
11. Кинематические особенности вязкого течения аморфного материала при равноканальном многоугольном прессовании через двухповоротный прямоугольный штамп / А. В. Периг, Н. Н. Голоденко, Я. Г. Жбанков, И. И. Бойко, А. А. Ситник // *Письма о материалах.* – 2011. – № 4. – С. 217–221.
12. 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.
13. Периг А. В. Физическое моделирование макроскопической ротации деформируемых материалов при равноканальном угловом прессовании / А. В. Периг, А. В. Тышкевич // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* – 2012. – № 2 – С. 41–46.
14. Perig A. V. Equal Channel Angular Extrusion of Soft Solids / A. V. Perig, A. M. Laptev, N. N. Golodenko et al. // *Materials Science and Engineering: A.* – 2010. – Vol. 527. – N 16–17, 25 June 2010. – P. 3769–3776.
15. Жбанков Я. Г. Численное моделирование исчерпания ресурса пластичности при равноканальном многоугольном прессовании / Я. Г. Жбанков, А. В. Периг, С. В. Мартынов // *Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : материалы 5-й международной научно-практической конференции 29.02.12 – 01.03.12 г.* – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2012. – С. 203–207.
16. Попов В. Л. Вихри пластической дилатации в твердых телах при интенсивных внешних воздействиях / В. Л. Попов, Е. Е. Слядников // *Письма в ЖТФ.* – 1995. – Том 21. – Вып. 2. – С. 84–88.
17. Утяшев Ф. З. Теоретические и прикладные аспекты получения и применения объемных ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов / Ф. З. Утяшев // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Харьков : НАУ ХАИ, 2010. – № 9 (76). – С. 12–18.
18. Sofuoglu H. Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes / H. Sofuoglu, J. Rasty // *Tribology International.* – 2000. – Vol. 33, № 8. – P. 523–529.
19. Chijiwa K. Characteristics of Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting / K. Chijiwa et al. // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan.* – 1981. – Vol. 21, № 8. – P. 178–186.

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

Голоденко Н. Н. – канд. физ.-мат. наук, доц. ДонНАСА;

Жбанков Я. Г. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ОМД ДГМА;

Бойко И. И. – студент ДГМА;

Матвеев И. 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

Статья поступила в редакцию 26.03.2012 г.