

УДК 621.7.043:621.777.01:539.89:539.381

**А.В. Периг, Н.Н. Голоденко, А.А. Зверев,  
А.А. Губенко, С.О. Юдин, А.М. Бойко**

**A.V. Perig, N.N. Golodenko, A.A. Zverev,  
A.A. Gubenko, S.O. Yudin, A.M. Boyko**

Донбасская государственная машиностроительная академия,  
г. Краматорск, Украина

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО МНОГОУГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ В U-ОБРАЗНОМ СКОШЕННОМ ШТАМПЕ**

### **HYDRODYNAMICAL SIMULATION OF EQUAL CHANNEL MULTIPLE ANGULAR EXTRUSION THROUGH THE U-SHAPED TAPERED DIE**

Динамика локального течения и характер формирования поворотных мод деформации при равноканальном многоугловом прессовании деформируемого материала в скошенном U-образном штампе проанализированы как с использованием эмпирического метода исходных кольцевых сеток, так и с применением методов расчетного гидродинамического моделирования. Расчетный подход реализован в рамках численного конечно-разностного решения уравнений Навье – Стокса в форме уравнения переноса вихря для локального вязкого течения несжимаемой ньютоновской сплошной среды через скошенный многоугловой U-штамп. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при осуществлении равноканального многоуглового прессования конструктивное геометрическое выполнение параллельных скосов в двухповоротном скошенном U-образном штампе обеспечивает локализацию максимальных касательных напряжений внутри материала заготовки именно в окрестностях данных геометрических скосов.

**Ключевые слова:** равноканальное многоугловое прессование, макроскопическая ротация, U-образный скошенный штамп, физическое моделирование, исходные кольцевые сетки, уравнение переноса вихря, краевая задача, конечно-разностное решение.

The present article is focused on the study of local flow dynamics and the character of formation of rotary modes of deformation during Equal Channel Multiple Angular Extrusion of workpiece through

the U-shaped tapered die. The present local flow problem through the U-shaped tapered die was analyzed with an introduction of physical simulation methods and numerical fluid dynamics simulation techniques. The computational approach has been grounded on the basis of the numerical finite difference solution of boundary value problem for Navier-Stokes equations in the curl transfer form for the local viscous flow of incompressible Newtonian continuum through the U-shaped tapered die. Derived research results allow us to draw a conclusion that the design geometrical implementation of parallel slants within 2-turn U-shaped tapered die provides the localization of maximal tangential stresses within workpiece volume just in the vicinity of these parallel slants during Equal Channel Multiple Angular Extrusion of workpiece through the U-shaped tapered die.

**Keywords:** equal channel multiple angular extrusion, macroscopic rotation, U-shaped tapered die, physical simulation, initial circular grids, curl transfer equation, boundary-value problem, finite difference solution.

К настоящему времени развитие схем интенсивного пластического деформирования (ИПД) при равноканальном многоугловом прессовании (РКМУП) связывается с дальнейшим увеличением длин обрабатываемых заготовок и повышением накопленных сдвиговых деформаций материалов посредством увеличения количества очагов деформации за каждый проход РКМУП (рис. 1–4). Решению указанных технологических задач посвящены работы В.А. Белошенко и др. [1], А.В. Перига и др. [2–4], а также ряда других исследователей. К многоугловым штампам могут быть отнесены двух-, трех-, ... и *n*-поворотные РКМУП-штампы с геометриями S-, U-, T-, X-, W-типов. Таким образом, характер локального течения заготовок при РКМУП определяется как геометрическими особенностями штамповой оснастки, так и реологией деформируемых металлических, полимерных, порошковых и композитных материалов. Как геометрия штампа, так и реология полуфабриката определяют кинематические и динамические особенности локального течения, углы поворотов главных осей течения, а также неоднородность поворота материала заготовки в U-штампе. При этом динамика макроскопической ротации при подготовке РКМУП-заготовок через U-штамп остается не вполне изученной, что и обуславливает важность и актуальность настоящего исследования.

Целью настоящей работы является установление кинематических и динамических особенностей локального течения заготовок в усеченных U-образных скошенных штампах с учетом эффектов вязкости (см. рис. 1–4).

На первом этапе исследования для решения поставленной задачи анализируем локальные особенности течения заготовок при РКМУП с применением таких методов физического моделирования, как методы маркеров и исходных кольцевых сеток.

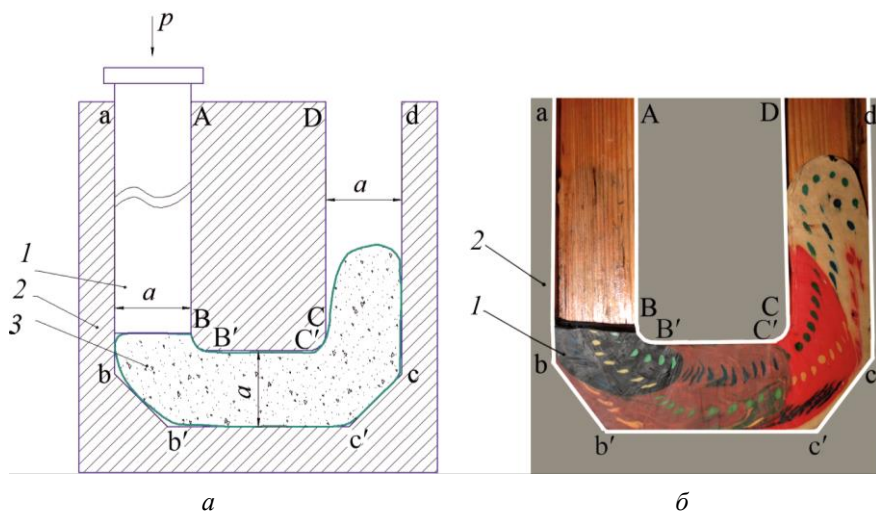


Рис. 1. РКМУП мягких составных физических моделей заготовок в U-штампе: *a* – схема течения заготовки; *б* – модель заготовки с исходной кольцевой сеткой; 1 – заготовка; 2 – разъемный штамп; 3 – деформирующий пуансон

Экспериментальная схема деформирования физических моделей составных заготовок при РКМУП через U-штамп  $abb'c'd - ABB'C'D$  (рис. 1, б, рис. 2, а, рис. 3, а и рис. 4, а) реализовывалась посредством последовательного продавливания четырех исходных заготовок в виде прямоугольных параллелепипедов с исходными кольцевыми сетками через усеченный U-штамп (см. рис. 1).

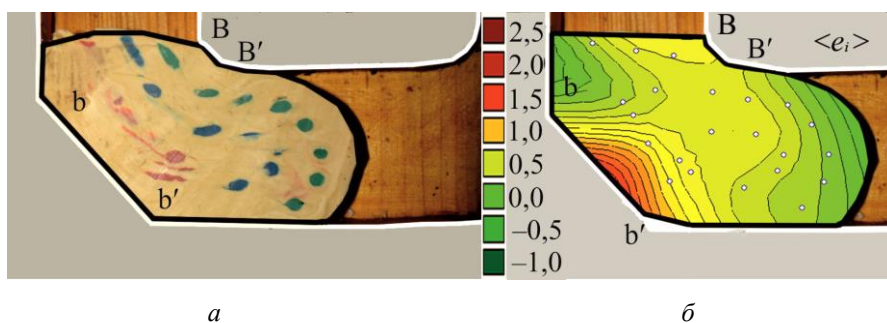


Рис. 2. Схема течения физической модели деформируемой заготовки с исходной кольцевой сеткой на начальном этапе заполнения переходного канала  $bb'BB'$  в U-штампе: *a* – мягкая модель заготовки; *б* – поле интенсивностей логарифмических деформаций

По мере увеличения суммарной длины составной заготовки обеспечивалось заполнение мягким материалом входного  $abAB$  (см. рис. 1), переходного  $b'c'B'C'$  (см. рис. 2, 3) и выходного  $cdCD$  (см. рис. 4) каналов многоугольного штампа.

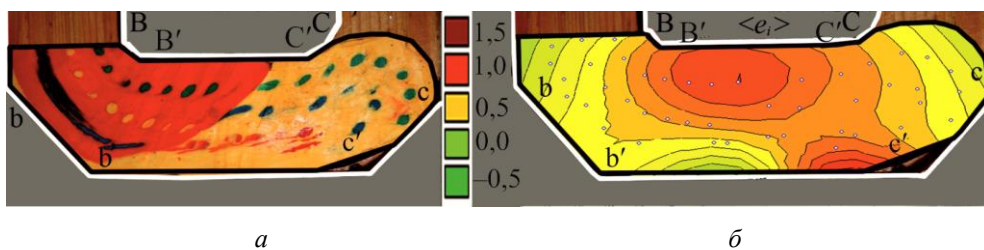


Рис. 3. Схема течения составной физической модели заготовки с исходной кольцевой сеткой на конечном этапе заполнения переходного канала  $b'c'B'C'$  в U-штампе:  $a$  – мягкая модель заготовки;  $b$  – поле интенсивностей логарифмических деформаций

В рамках обработки экспериментальных результатов на рис. 1,  $b$ , рис. 2,  $a$ , рис. 3,  $a$  и рис. 4,  $a$  были рассчитаны соответствующие эпюры интенсивностей логарифмических деформаций  $\langle e_i \rangle$  (см. рис. 2,  $b$ , рис. 3,  $b$  и рис. 4,  $b$ ). Эпюры  $\langle e_i \rangle$  показывают характер последовательного перемещения зон локализации максимальных значений  $\langle e_i \rangle$  при осуществлении РКМУП в U-штампе из переходной срезанной зоны  $bb'BB'$  (рис. 2,  $b$ ) в зону переходного канала  $b'c'B'C'$  (см. рис. 3,  $b$ , рис. 4,  $b$ ). При этом средние экспериментальные значения интенсивностей деформаций  $\langle e_i \rangle$  составляют: 0,490 на рис. 2; 0,458 на рис. 3 и 0,839 на рис. 4, что показывает рост значения  $\langle e_i \rangle$  по мере дальнейшего деформирования заготовки в срезанном U-штампе (см. рис. 2–4).

Если под усредненной неравномерностью логарифмических деформаций понимать величину, определяемую как  $\langle e_{iNU} \rangle = (1/2)((e_{i\max} - \langle e_i \rangle)/e_{i\max}) + ((e_{i\max} - \langle e_i \rangle)/\langle e_i \rangle)$ , то экспериментальные результаты на рис. 2–4 показывают, что неравномерность деформаций  $\langle e_{iNU} \rangle = 1,07$  на рис. 2,  $\langle e_{iNU} \rangle = 0,892$  на рис. 3 и  $\langle e_{iNU} \rangle = 12,341$  на рис. 4. Таким образом экспериментально наблюдается существенное повышение неравномерности деформаций по мере перетекания деформируемого материала заготовки в выходной канал  $cdCD$  (см. рис. 4).

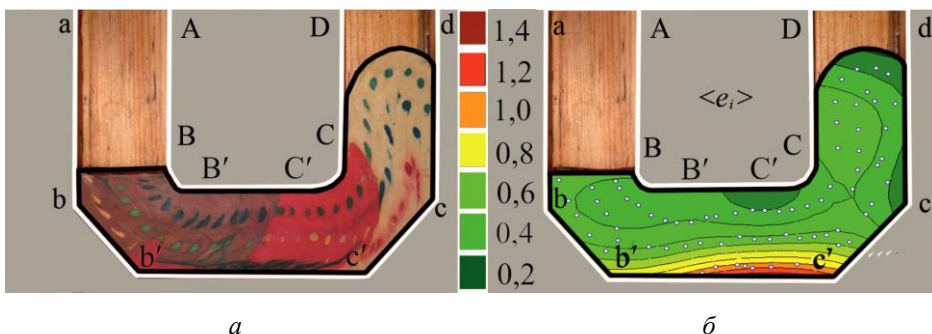


Рис. 4. Схема течения составной физической модели заготовки с исходной кольцевой сеткой на начальном этапе заполнения выходного канала  $cdCD$  в U-штампе:  $a$  – мягкая модель заготовки;  $b$  – поле интенсивностей логарифмических деформаций

Сложный характер локального течения материала заготовки в U-штампе дополнительно характеризуется такими деформационными параметрами, как степень «перемешивания», макроскопическая ротация и неоднородность поворота материала заготовки. Под степенью «перемешивания»  $\alpha$  и макроскопической ротацией  $\Delta\alpha$  на рис. 1, б, рис. 2, а, рис. 3, а и рис. 4, а понимаются угол наклона  $\alpha$  и приращение угла наклона  $\Delta\alpha$  большой оси деформированного эллиптического маркера с направлениями  $ab, bb', b'c', c'c, cd$  течения заготовки соответственно. Экспериментально измеренные усредненные значения степени «перемешивания» материала с учетом и без учета алгебраических знаков  $\alpha$  составляют:  $\langle\alpha\rangle = 20,541^\circ$  и  $\langle|\alpha|\rangle = 20,246^\circ$  на рис. 2;  $\langle\alpha\rangle = \langle|\alpha|\rangle = 42,824^\circ$  на рис. 3;  $\langle\alpha\rangle = 36,887^\circ$  и  $\langle|\alpha|\rangle = 36,685^\circ$  на рис. 4, что показывает общее повышение степени «перемешивания» материала по мере его дальнейшего деформирования в срезанном равноканальном U-штампе.

Под неоднородностью поворота материала следует понимать возникновение точек перегиба и «перетяжек» внутри эллиптических маркеров, что визуально наблюдается на экспериментальных срезах физических моделей заготовок на рис. 1, б, рис. 2, а, рис. 3, а и рис. 4, а. Для количественного феноменологического описания экспериментально наблюдаемой на рис. 1, б, рис. 2, а, рис. 3, а и рис. 4, а динамики макроскопической ротации воспользуемся расчетным гидродинамическим подходом.

Для вязких течений физических моделей составных деформируемых заготовок на рис. 1, б, рис. 2, а, рис. 3, а и рис. 4, а в срезанном U-штампе  $abb'c'cd - ABB'C'D$  в качестве первого приближения воспользуемся уравнениями Навье – Стокса в форме уравнений переноса вихря для несжимаемой сплошной среды (рис. 5, б):

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} = -\text{Re}\left(\frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\zeta}{\partial y^2}\right), \quad \zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $u$  и  $v$  – безразмерные  $x$ - (рис. 5, б) и  $y$ - (рис. 5, в) проекции полной скорости  $w$  (рис. 5, г) точек континуума;  $\zeta$  – безразмерная функция вихря (рис. 6, б);  $t$  – безразмерное время РКМУП;  $x$  и  $y$  – безразмерные прямоугольные координаты.

Уравнение (1) записывается в конечно-разностной форме для последующего численного интегрирования по методу чередующихся направлений (см. рис. 5, б).

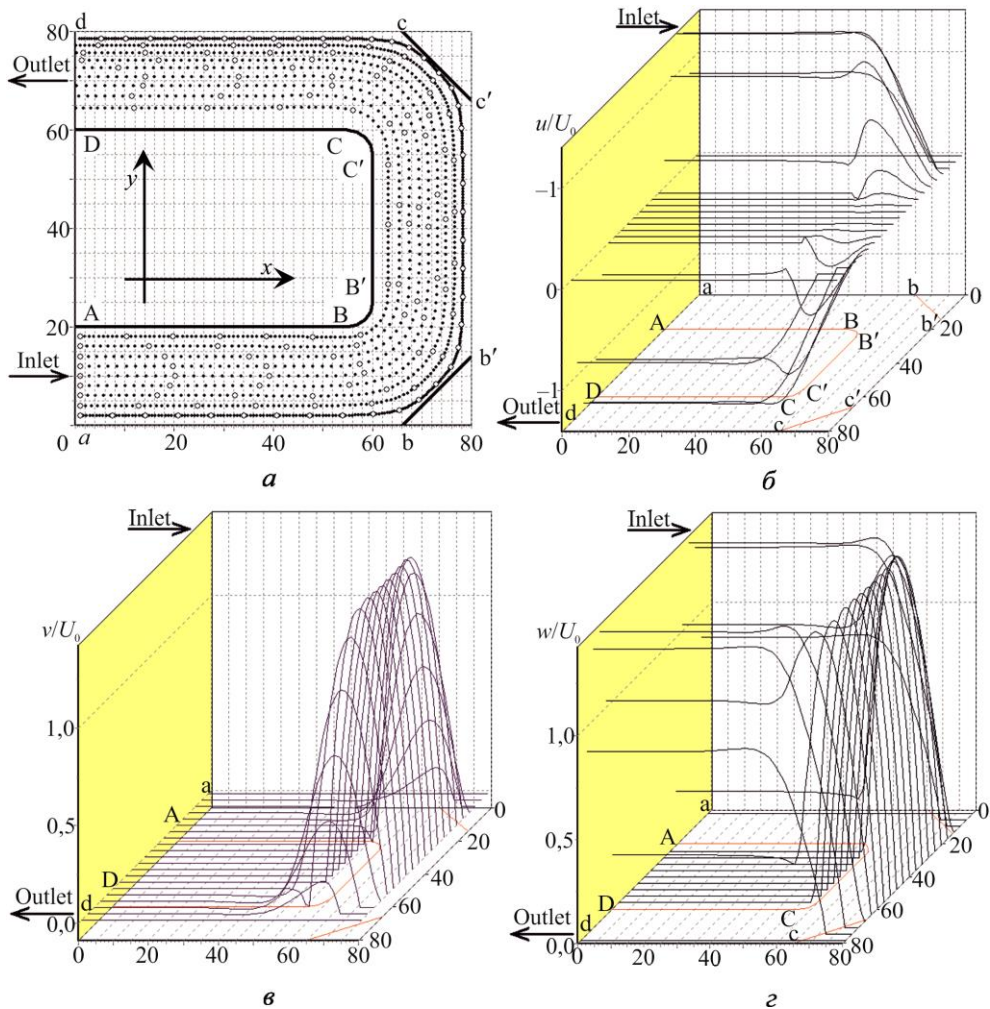


Рис. 5. Расчетные эпюры основных кинематических параметров локального вязкого течения материала в усеченном U-штампе: *a* – расчетные линии тока; *б* – безразмерная проекция скорости потока на ось *x*; *в* – проекция скорости потока на ось *y*; *г* – поле безразмерной полной скорости потока

Рассматриваем установившийся режим локального течения (рис. 1, б, рис. 3, а, рис. 4, а, рис. 5, б). Начальные условия для (1) примем в виде грубого приближения к стационарному решению:

$$u_{i,j}^0 = 0, v_{i,j}^0 = 0, \zeta_{i,j}^0 = 0, \psi_{i,j}^0 = 0, \quad (2)$$

где *i, j* – номера ячеек разностной сетки, причем *i* соответствует оси *x* и *j* соответствует оси *y*.

Граничные условия для стенок штампа определим из условий прилипания деформируемого материала к стенкам штампа. Для внутренней границы

вязкого потока ABCD на рис. 1–6 имеем  $\psi_{ij} = 1$ . Для внешней границы вязкого потока abcd на рис. 1–6 принимаем  $\psi_{ij} = 0$ . Для вертикального внутреннего участка AB имеем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ , где  $\eta$  – безразмерный шаг координаты вдоль оси  $y$ . Для горизонтального внутреннего участка B'C' записываем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}) / \xi^2$ , где  $\xi$  – безразмерный шаг координаты вдоль оси  $x$ . Для вертикального внутреннего участка CD  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ . Для вертикального внешнего участка ab записываем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ . Для горизонтального внешнего участка b'c' имеем  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ . Для вертикального внешнего участка cd имеет место  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ . Для переходного левого нижнего скоса bb' можно записать, что  $\zeta_{i,i-68} = 2(\psi_{i-1,i-68} + \psi_{i,i-67} - 2\psi_{i,i-68}) / \eta^2$ . Для переходного правого нижнего скоса c'c имеет место  $\zeta_{i,148-i} = 2(\psi_{i-1,148-i} + \psi_{i,147-i} - 2\psi_{i,148-i}) / \eta^2$ . Для отрезка от  $i = 56$  до  $i = 58$  на левом внутреннем переходном закругленном участке BB' в зоне сопряжения входного и переходного каналов имеем  $\zeta_{i,i-34} = 2(\psi_{i+1,i-34} + \psi_{i,i-35} - 2\psi_{i,i-34}) / \eta^2$ . Для отрезка от  $i = 56$  до  $i = 58$  на правом внутреннем переходном закругленном участке C'C граничное условие записываем как  $\zeta_{i,114-i} = 2(\psi_{i-1,114-i} + \psi_{i,113-i} - 2\psi_{i,114-i}) / \eta^2$ .

Для угловых точек, лежащих в вершинах вогнутых углов b, b', c, c', имеем  $\zeta_{i,j} = 0$ . Для угловой точки B в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j - 1)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j-1} - 1) / \eta^2$ , а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i + 1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = (\psi_{i+1,j-1} - 1) / \xi^2$ . Для угловой точки C в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j + 1)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j+1} - 1) / \eta^2$ , а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i + 1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = (\psi_{i+1,j+1} - 1) / \xi^2$ . Для угловой точки B' в разностном уравнении, записанном для узла  $(i + 1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i+1,j} - 1) / \xi^2$ , а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j - 1)$ ,  $\zeta_{i,j} = (\psi_{i+1,j-1} - 1) / \xi^2$ . Для угловой точки C' в разностном уравнении, записанном для узла  $(i + 1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i+1,j} - 1) / \xi^2$ , а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j + 1)$ ,  $\zeta_{i,j} = (\psi_{i+1,j+1} - 1) / \xi^2$ . На входе aA:  $\psi_{0,j} = \psi_{1,j}$ ,  $u_{0,j} = 1$ ,  $v_{0,j} = 0$ . На выходе dD:  $\psi_{0,j} = 2\psi_{1,j} - \psi_{2,j}$ ,  $\zeta_{0,j} = 0$ ,  $\zeta_{1,j} = 0$ .



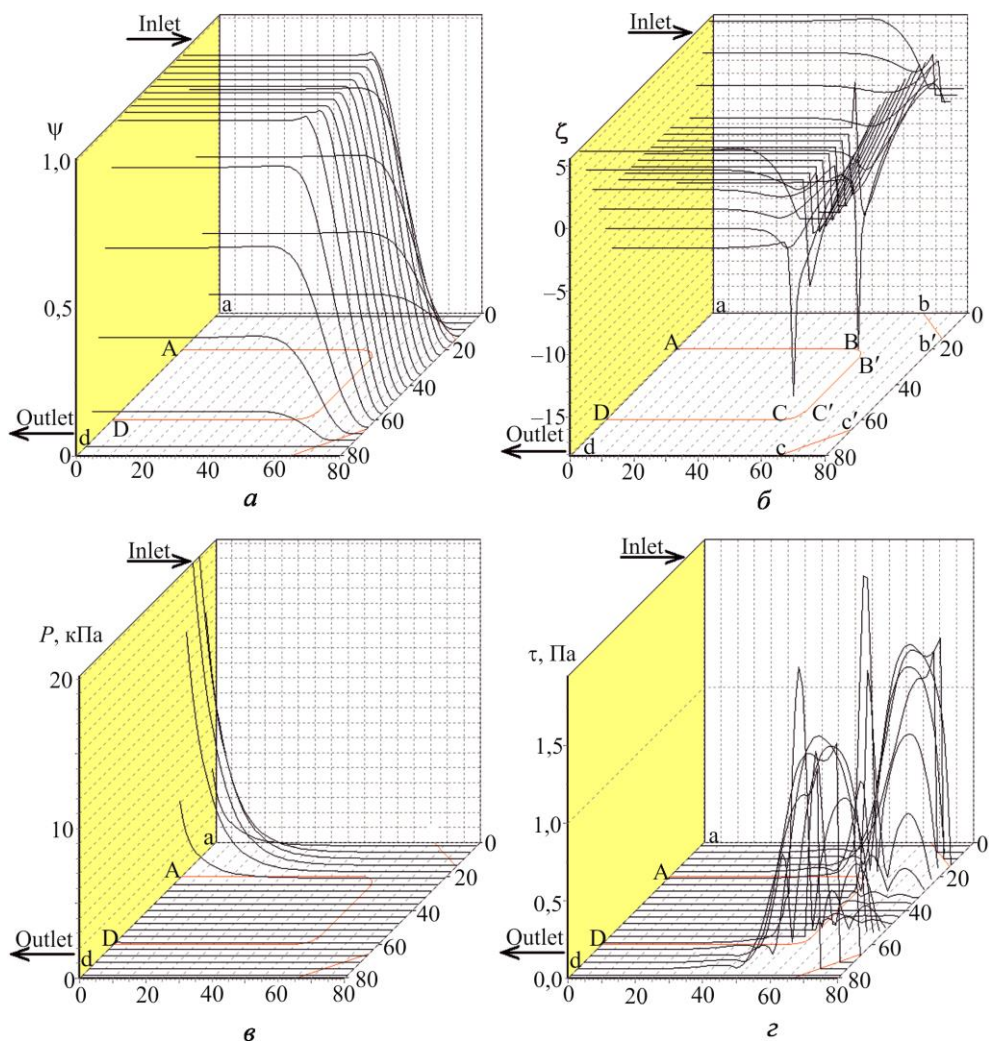


Рис. 6. Расчетные эпюры основных динамических параметров локального вязкого течения материала в усеченном U-штампе:  $a$  – безразмерная функция тока  $\psi$ ;  $б$  – безразмерная функция вихря  $\zeta$ ;  $в$  – поле давления прессования;  $г$  – поле касательных напряжений внутри вязкого потока

Численные результаты интегрирования (1) с начальными условиями (2) и вышеизложенными граничными условиями приведены на рис. 5–6 для следующих численных значений входящих величин: размерная ширина входного, переходного и выходного каналов  $\bar{a} = 40$  мм; среднее значение размерной скорости перемещения пуансона при РКМУП  $\bar{U}_0 = 270$  мкм/с; размерная плотность материала физической модели заготовки  $\bar{\rho} = 1850$  кг/м<sup>3</sup>; размерная удельная теплоемкость материала физической модели заготовки  $\bar{c} = 1000$  Дж/(кг·К); размерный коэффициент динамической вязкости для



вязкой ньютоновской гидродинамической модели материала заготовки при РКМУП  $\bar{\eta}_{\text{vis}} = 135 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; размерный коэффициент кинематической вязкости для вязкой гидродинамической модели деформируемой заготовки при РКМУП  $\bar{\nu}_{\text{vis}} = \bar{\eta}_{\text{vis}}/\bar{\rho} = 0,073 \text{ м}^2/\text{с}$ ; число Рейнольдса вязкой ньютоновской гидродинамической модели деформируемой заготовки при РКМУП  $\text{Re} = \bar{U}_0 \bar{a} \bar{\rho} / \bar{\eta}_{\text{vis}} = 1,48 \cdot 10^{-4}$ ; размерный шаг итераций по времени  $\bar{\tau} = \bar{t}_{\text{it}} = 74 \text{ мс}$ ; относительная погрешность итераций  $e = 10^{-3}$ ; размерный момент времени для построения первой изохроны  $\bar{t}_1 = 100 \text{ с}$ ; полное время интегрирования для (1)–(2) 43 241 мс; число шагов координатной сетки по горизонтали 80, по вертикали 80, шаг координаты 2 мм.

Неустойчивости численного решения, зарождающиеся на входной границе  $aA$ , распространяются вниз по потоку по направлению  $bBb'V'c'CcD$ , а неустойчивости, зарождающиеся на выходной границе  $dD$ , – вверх по потоку по направлению  $dDcCc'c'b'V'bV$ . Численное решение на рис. 5–6 дает результаты, согласующиеся с физическим экспериментом на рис. 1, б, рис. 2, а, рис. 3, а и рис. 4, а лишь в том случае, когда вход  $aA$  и выход  $dD$  потока находятся достаточно далеко от интересующей нас переходной области  $bb'c'c' - BB'c'c'$ , в идеале на бесконечности. Для минимизации искажений, вызванных расчетными неустойчивостями численного конечноразностного решения на входе  $aA$ , начальные точки линий тока (см. рис. 5, а) взяты не у границы координатной сетки, соответствующей входу  $aA$  потока ( $i = 0$ ), а на удалении 20 ячеек от нее с одинаковым шагом  $a/10$  по вертикали. Точно так же следует обрезать расчетные линии тока на расстоянии 20 ячеек от границы координатной сетки, соответствующей выходу  $dD$  потока ( $i = 0$ ), чтобы пренебречь расчетными искажениями, вызванными неустойчивостями на выходе  $dD$ .

Проанализируем и сопоставим между собой результаты физического (см. рис. 1–4) и численного (см. рис. 5, 6) экспериментов. Конструктивная реализация скошенной штамповой оснастки в виде двух параллельных скосов  $bb'-BB'$  и  $c'c'-C'C$  обеспечила отсутствие застойных зон течения материала, что видно как на экспериментальных рис. 1, б, рис. 2, а, рис. 3, а и рис. 4, а, так и на расчетных линиях тока на рис. 5, а и функции тока на рис. 6, а. Локализация зон с максимальными значениями экспериментальных интенсивностей логарифмических деформаций последовательно проиллюстрирована на рис. 2, б, рис. 3, б и рис. 4, б. Эпюры на рис. 2, б, рис. 3, б и рис. 4, б показывают характер перемещения очага деформации внутри деформированного материала по мере продавливания заготовки через усеченный U-штамп в рамках реализации РКМУП. На первой экспериментальной эпюре на рис. 2, б показано, что на начальном этапе течения очаг деформации сосредоточен в окрестности линии  $bb'$ , т.е. охватывает внешние волокна деформированного

материала, прилегающие к переходному левому нижнему скосу  $bb'$ . На второй экспериментальной эпюре на рис. 3, б визуализировано, что на конечном этапе заполнения переходного канала  $b's'V'C'$  очаг деформации заготовки полностью перемещается в окрестность горизонтального внутреннего переходного участка  $V'C'$ , т.е. охватывает внутренние волокна деформированного материала  $V'C'$  и, следовательно, выходит за пределы входной зоны  $bb'BB'$ . В то же время на начальном этапе заполнения выходного канала  $cdCD$  имеет место перемещение очага деформации заготовки в окрестность горизонтального внешнего переходного участка  $b's'$ , т.е. новая локализация очага деформации охватывает внешние волокна деформированного материала в окрестности линии  $b's'$ . Именно таким образом в процессе РКМУП в рассматриваемом усеченном U-штампе происходит последовательная деформационная проработка проковом и «перемешиванием» то внешних, то внутренних волокон исходной длинномерной заготовки, что и обеспечивает накопление значительных сдвиговых деформаций за каждый проход РКМУП. На расчетных эпюрах на рис. 5, в, г и на рис. 6, г показано, что по мере прохождения экструдированного материала к выходному каналу U-штампа в объеме заготовки формируются значительные градиенты скоростей и касательных напряжений, локализация которых в точности соответствует зонам двух параллельных скосов  $bb'–BB'$  и  $c's'–C'C$ . Наблюдаемое формирование градиентов касательных напряжений на расчетной эпюре на рис. 6, г является гидродинамической иллюстрацией наличия поворотных мод деформации, визуально наблюдаемых на экспериментальных эпюрах на рис. 1, б – 4. Совместное применение методов физического (см. рис. 1, б – 4) и расчетного гидродинамического моделирования (рис. 5, б) обеспечивает получение новых экспериментально-теоретических результатов, иллюстрирующих динамику локального течения материалов при ИПД РКМУП в усеченных U-образных скошенных штампах. Предложенная гидродинамическая методика (см. рис. 1–6) представляется перспективной для анализа РКМУП через штампы с более сложными геометриями S-, T-, X-, W-типов, причем и с наличием подвижных входных и переходных стенок штампов.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при осуществлении равноканального многоугольного прессования конструктивное геометрическое выполнение параллельных скосов в двухповоротном усеченном

U-образном штампе обеспечивает локализацию максимальных касательных напряжений внутри материала заготовки в окрестностях данных скосов. Полученные экспериментально-теоретические результаты опираются на эмпирический анализ исходных кольцевых сеток, а также на результаты численного конечно-разностного решения уравнений Навье – Стокса в форме урав-

нения переноса вихря для локального вязкого течения несжимаемой ньютоновской сплошной среды через срезанный многоугольной U-штамп. Полученные экспериментально-теоретические результаты расширяют представления о динамике локального течения и характере формирования поворотных мод деформации при прессовании деформируемого материала в усеченном U-образном штампе и находят дальнейшее применение в анализе сдвиговых течений в многоугольных равноканальных штампах более сложной геометрии.

### **Список литературы**

1. Белошенко В.А., Возняк А.В., Возняк Ю.В. Твердофазная экструзия полиамида, осуществляемая при простом сдвиге // Высокомолекулярные соединения. – 2009. – Т. 51, № 8. – С. 1473–1480.

2. Периг А.В., Голоденко Н.Н. О динамических особенностях вязкого течения полимеров при равноканальном многоугольном прессовании через штамп с подвижной стенкой // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 3. – С. 149–176.

3. 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. – Т. 1, № 4. – С. 217–221.

4. Физическое моделирование равноканального многоугольного прессования через двухповоротный прямоугольный штамп / А.В. Периг, И.И. Бойко, А.А. Ситник, И.А. Матвеев, С.В. Подлесный, С.И. Бондаренко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 5. – С. 23–27.

Получено 6.02.2014

**Периг Александр Викторович** – кандидат технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия (84313, Украина, Донецкая область, г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72, e-mail: olexander.perig@gmail.com).

**Голоденко Николай Никитич** – кандидат физико-математических наук, доцент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (86123, Украина, г. Макеевка, ул. Державина, 2, e-mail: nik\_nik\_gold@mail.ru).

**Зверев Александр Андреевич** – инженер, Донбасская государственная машиностроительная академия (84313, Украина, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72, e-mail: zver-sasha@yandex.ru).

**Губенко Александр Александрович** – соискатель, Донбасская государственная машиностроительная академия (84313, Украина, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72, e-mail: ronaldo-roney7@mail.ru).

**Юдин Станислав Олегович** – соискатель, Донбасская государственная машиностроительная академия (84313, Украина, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72, e-mail: judstas@rambler.ru).

**Бойко Александр Михайлович** – соискатель, Донбасская государственная машиностроительная академия (84313, Украина, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72).

**Perig Alexander Viktorovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Donbass State Engineering Academy (84313, Ukraine, Donetsk Region, Kramatorsk, Shkadinova, 72, e-mail: olexander.perig@gmail.com).

**Golodenko Nikolai Nikitich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (86123, Ukraine, Makeyevka, Derzhavin st., 2, e-mail: nik\_nik\_gold@mail.ru).

**Zverev Alexander Andreyevich** – Engineer, Donbass State Engineering Academy (84313, Ukraine, Donetsk Region, Kramatorsk, Shkadinova, 72, e-mail: zver-sasha@yandex.ru).

**Gubenko Alexander Alexandrovich** – Applicant, Donbass State Engineering Academy (84313, Ukraine, Donetsk Region, Kramatorsk, Shkadinova, 72, e-mail: ronaldo-roney7@mail.ru).

**Yudin Stanislav Olegovich** – Applicant, Donbass State Engineering Academy (84313, Ukraine, Donetsk Region, Kramatorsk, Shkadinova 72, e-mail: judstas@rambler.ru).

**Boyko Alexander Mikhailovich** – Applicant, Donbass State Engineering Academy (84313, Ukraine, Donetsk Region, Kramatorsk, Shkadinova, 72).