

О. В. Періг¹, О. М. Лаптев¹, М. М. Голоденко², С. В. Подлесний¹, А. К. Кох¹

Комп'ютерне прогнозування структурних перетворень у матеріалі при рівноканальному кутовому пресуванні

¹Донбаська державна машинобудівна академія, вул. Шкадінова, 72,
м. Краматорськ Донецької області, 84313, +38-095-169-57-35, olexander.perig@gmail.com

²Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна, 2,
м. Макіївка Донецької області, 86123, +38-066-240-91-27, nik_nik_Gold@mail.ru

На основі чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса показана можливість попереднього розрахунку структурних перетворень у матеріалах, підданих пластичній деформації у процесі рівноканального кутового пресування (РККП) через непрямокутний штамп із зовнішнім закругленням, що дозволяє визначити оптимальні енергосилові параметри для даної схеми пресування, дослідити ступінь нерівномірності деформованого стану, побудувати лінії току і поля швидкостей, а також проаналізувати правомірність існуючої аналогії між турбулентною течією в'язких рідин і пластичною течією полікристалів при РККП.

Ключові слова: рівноканальне кутове пресування, рівняння Нав'є-Стокса, скінченнорізницевий розв'язок, фізичне моделювання, пластилін

Стаття постуила до редакції 17.11.2009; прийнята до друку 15.06.2010.

Вступ

Нині методи інтенсивного пластичного деформування (ІПД) становлять неабияку цінність для сучасних металургії, машинобудування, хімічної промисловості і медицини. Одним із головних напрямів ІПД є рівноканальне кутове пресування (РККП) або рівноканальне кутове видавлювання (РККВ), яке дозволяє одержувати дрібнозернисті метали, сплави, композити і порошкові напівфабрикати з підвищеними показниками утомної міцності при збереженні високої питомої міцності і технологічної пластичності в області експлуатаційних температур для деталей та несних конструкцій авіаційної техніки, обладнання хімічної промисловості, медичних імплантантів тощо [1]. Окрім того, при обробці полімерних матеріалів РККП забезпечує істотні структурні зміни вихідного матеріалу, пов'язані із руйнуванням сферолітів і трансформацією їх у пакети кристалічних ламелей, а також підвищення квазістатичної тріщиностійкості та ударної міцності аморфно-кристалічних і аморфних полімерів та полімерних композитів [2]. Процес РККП здійснюється накопиченням пластичної деформації у оброблюваному матеріалі шляхом багаторазового деформування змазаної заготовки у штампі із двома претинними каналами однакового

поперечного перерізу при збереженні її початкових форми і розмірів [3].

Водночас перебіг процесу РККП характеризується значними нерівномірністю і неоднорідністю деформованого стану оброблюваного матеріалу, що до певної міри ускладнює промислове застосування технології РККП і вимагає ґрунтовного дослідження як деформованого стану оброблюваних заготовок, так і геометричних особливостей пластичної течії матеріалів у кутових штампах. Окрім того, сучасні гіпотези про існування аналогії між пластичною течією полікристалів при РККП із турбулентною течією рідин [4] не повною мірою узгоджуються із класичною теорією пластичності і потребують додаткових досліджень, що і визначає актуальність досліджуваної проблеми.

Основні особливості пластичної течії матеріалів при РККП можна проаналізувати із застосуванням таких геометричних методів, як метод шаруватих моделей (рис. 1а) [5] або метод маркерів [6]. При цьому у відомих раніше публікаціях [5]-[7] не досліджувались питання динаміки локальної пластичної течії матеріалів при фізичному моделюванні РККП через штампи зі складною геометрією, зокрема, із тупим кутом між вхідним та вихідним каналами і зовнішнім закругленням у зоні сполучення каналів, що дозволяє сформулювати

завдання нинішнього дослідження:

I. спроектувати і розробити технологічне устаткування для емпіричного дослідження нерівномірності і неоднорідності деформованого стану оброблюваних матеріалів при РККП;

II. вивчити вплив реологічних особливостей оброблюваних матеріалів на ступінь неоднорідності деформованого стану на прикладі в'язкої течії пластиліну у непрямокутному кутовому штампі із зовнішнім закругленням;

III. дослідити правомірність існуючої аналогії між пластичною течією полікристалів при РККП із турбулентною течією в'язких рідин, а також врахувати фрагментацію структури оброблюваного матеріалу при РККП в межах класичної механіки суцільних середовищ.

I. Аналіз локальної течії матеріалів при РККП

Проаналізуємо локальну пластичну течію м'яких матеріалів при фізичному моделюванні РККП. В якості в'язкого наближення до аналізу течії матеріалу при РККП застосуємо рівняннями імпульсу або, інакше кажучи, рівняннями Нав'є-Стокса [8]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \frac{\bar{h}}{\bar{r}} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{h}}{\bar{r}} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right) \quad (2)$$

і рівняння нерозривності

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

де рискою угорі позначені розмірні величини: \bar{x}, \bar{y} – координати; \bar{t} – час; \bar{u} і \bar{v} – розмірні складові швидкості уздовж осей x і y відповідно; \bar{r} і \bar{h} – густина і в'язкість оброблюваного матеріалу; \bar{P} – тиск пресування.

Для створення математичної моделі задачі, зручної для теоретичного аналізу, а також задля забезпечення загальності розв'язків, вводяться наступні безрозмірні величини: $x = \bar{x} / \bar{a}$, $y = \bar{y} / \bar{a}$ – безрозмірні координати, де характерний розмір \bar{a} – ширина каналу; $u = \bar{u} / \bar{U}_0$, $v = \bar{v} / \bar{U}_0$ – безрозмірні складові швидкості уздовж осей x і y , де \bar{U}_0 – швидкість матеріалу у вхідному каналі штампі; $P = \bar{P} / (\bar{r} \bar{U}_0^2)$ – безрозмірний тиск, $Re = \bar{U}_0 \bar{a} \bar{r} / \bar{h}$ – число Рейнольдса; $t = \bar{t} \bar{h} / (\bar{r} \bar{a}^2)$ – безрозмірний час; $x = Re \cdot ut$, $y = Re \cdot vt$ – безрозмірні координати.

Водночас необхідно відзначити, що чисельний розв'язок системи (1)-(2) вимагає порівняно великого часу обчислень і не повною мірою враховує вплив

вхідного і вихідного каналів штампі (рис. 1а, б). Отже є сенс розглянути рівняння переносу вихору (рис. 1з) і тим самим розв'язувати лише одне рівняння замість системи (1)-(2).

Виконаємо диференціювання (1) по y і (2) по x , виключимо тиск і визначимо вихор як

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

У такий спосіб маємо рівняння переносу вихору

$$\frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{t}} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{x}} - \bar{v} \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{h}}{\bar{r}} \left(\frac{\partial^2 \bar{z}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{z}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (5)$$

Це ж рівняння в консервативній формі має вигляд

$$\frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{t}} = -\frac{\partial (\bar{u} \bar{z})}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial (\bar{v} \bar{z})}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{h}}{\bar{r}} \left(\frac{\partial^2 \bar{z}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{z}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (6)$$

Будемо визнати функцію току \bar{y} співвідношеннями

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

Тоді рівняння вихору (4) запишемо у вигляді

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

Якщо перейти до безрозмірних змінних, то безрозмірний вихор визначається як $z = \bar{z} \bar{a} / \bar{U}_0$ (рис. 1з), а безрозмірна функція току є $y = \bar{y} / (\bar{U}_0 \bar{a})$ (рис. 1в). Тоді рівняння переносу вихору (6) запишемо як

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\text{Re} \left(\frac{\partial (uz)}{\partial x} - \frac{\partial (vz)}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}. \quad (9)$$

Рівняння (7) для функції току набудуть вигляду

$$\frac{\partial y}{\partial y} = u, \quad \frac{\partial y}{\partial x} = -v, \quad (10)$$

а власне вихор (4) запишеться як

$$z = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (11)$$

Алгоритм чисельного розв'язку рівняння (9) у випадку РККП можна проілюструвати наступною блок-схемою (рис. 2). Програмна реалізація зазначеного алгоритму здійснена у середовищі Delphi. Наразі процес обчислення відбувається досить швидко, оскільки замість системи рівнянь (1)-(2) розв'язується лише одне рівняння (9), причому вся різноманітність в'язких течій матеріалів при пресуванні описується рішеннями одних і тих самих диференціальних рівнянь в частинних похідних, рівнянь Нав'є-Стокса. Різні течії (тобто рішення) відрізняються лише граничними і початковими умовами, а також такими параметрами рішення як число Рейнольдса Re . Якщо говорити саме про усталений режим РККП, то початкові умови візьмемо у вигляді грубого наближення до стаціонарного

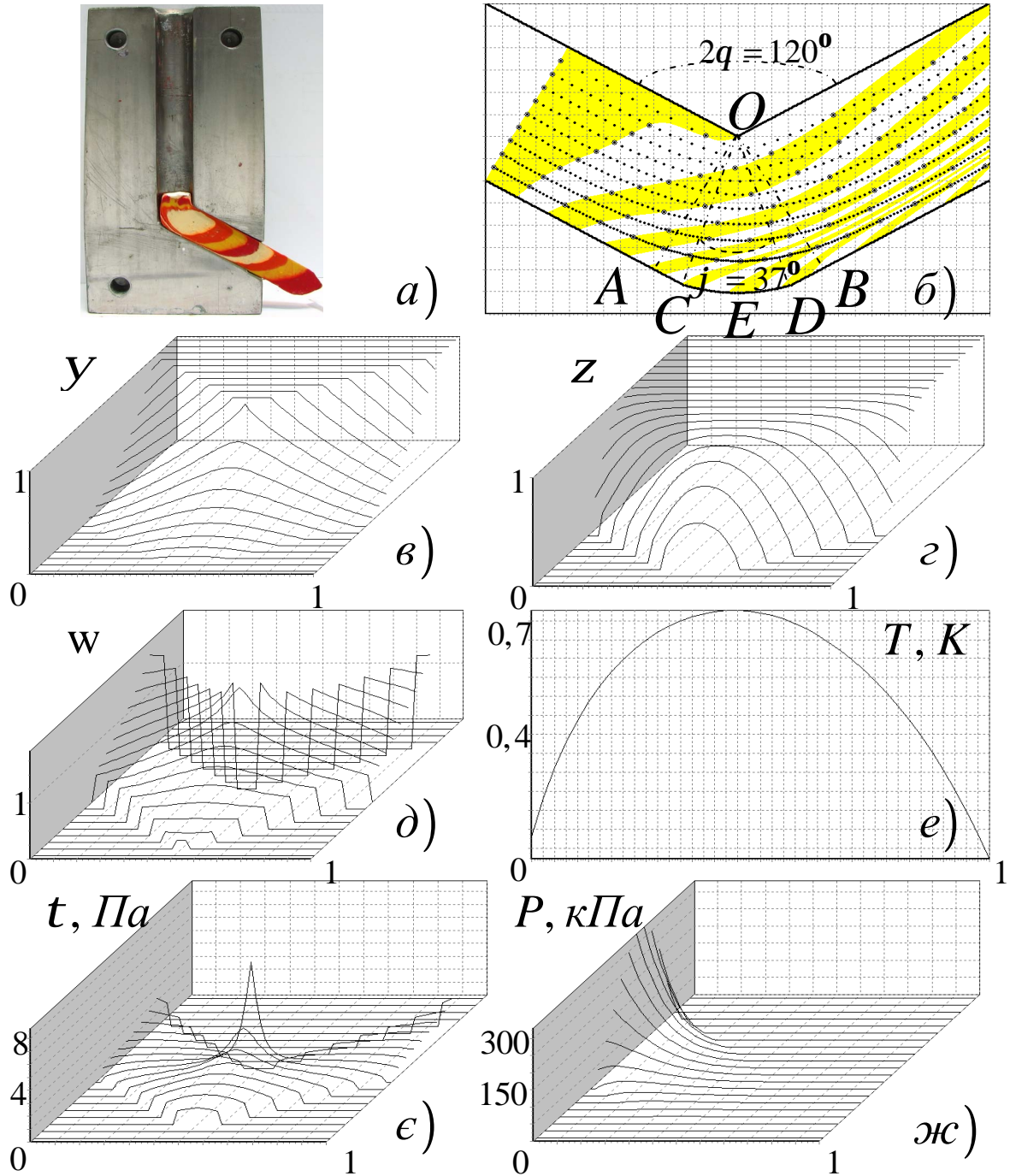


Рис. 1. Розрахункові поля енергосилових параметрів процесу РККП пластиліну через непрямокутний штамп із $2\theta=120^\circ$ і зовнішнім закругленням $\varphi=37^\circ$: (а) – шарувата пластилінова модель на проміжній стадії РККП в металевому роз’ємному штампі; (б) – розрахункові лінії струму в осередку пластичної деформації AOB ; (в) – функція току ψ ; (г) – функція вихору ζ ; (д) – поле повної швидкості потоку w ; (е) – епюра розігріву заготовки; (ж) – епюра дотичних напружень і (з) – епюра тиску у осередку пластичного деформування, причому на усіх епюрах (б)-(ж) вхід у осередок деформування зліва, а вихід – вправо.

рішення:

$$u_{i,j}^0 = 0; v_{i,j}^0 = 1; z_{i,j}^0 = 1; y_{i,j}^0 = -i/m, \quad (12)$$

де m – число кроків координати на ширині каналу.

Граничні умови для досліджуваної задачі

сформуємо із наступних міркувань. Сім'я ліній функції току $y(x, y) = const$ являє собою сукупність ліній току. Тобто на зовнішній закругленій стінці штампу CED (рис. 1б), яка теж є лінією току, ми аналогічно маємо $y(x, y) = const$.

Тому на закругленій стінці штампу $CEД$ довільно приймаємо $z = 0$, $y = 0$, а у внутрішній точці O , довкола якої закручуються лінії току, вважаємо $z = 1$, $y = 1$, причому одиниця приймається тому,

що всі величини є безрозмірними (рис. 1б):

$$\begin{cases} z(x,y)=0, y(x,y)=0 & (\text{зовнішнє закруглення штампу } CEД), \\ z(x,y)=1, y(x,y)=1 & (\text{внутрішній кут } O \text{ штамп}). \end{cases} \quad (13)$$



Рис. 2. Блок-схема алгоритму розв'язання рівняння Нав'є-Стокса, записаного у випадку рівноканального кутового пресування для змінних функції току ψ і вихору ζ

Граничні умови для витрати в'язкого матеріалу на вході у осередок пластичного деформування задаються співвідношеннями Пуазейля, а в'язкість матеріалу визначаємо методом послідовних наближень (рис. 2) відповідно до експериментально вимірених значень тиску пресування і швидкості матеріалу на вході у осередок пластичної деформації.

Рівняння (9) із початковими умовами (12) і граничними умовами (13) були розв'язані чисельно за схемою Річардсона для течії пластиліну в непрямокутному штампі для РККП із $2\theta=120^\circ$ і зовнішнім закругленням $\varphi=37^\circ$ при наступних числових значеннях: густина пластиліну $\rho = 1850 \text{ кг/м}^3$, межа текучості $S_S = 217 \text{ кПа}$ [9], ширина кожного каналу $a = 15 \text{ мм}$, швидкість пресування $U_0 = 0,36 \text{ мм/с}$, в'язкість плинного матеріалу $h = 55 \text{ Па}\cdot\text{с}$, число Рейнольдса $Re = 1,82 \cdot 10^{-4}$, питома теплоємність пластиліну $c = 1,004 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, питома теплопровідність $0,7 \text{ Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{К)}$, кількість кроків координати уздовж осі $n = 80$, відносна похибка ітерацій становить $e = 10^{-2}$, момент часу для побудови першої

ізохрони є $t_1 = 20 \text{ с}$, тиск пресування на вході є $P = 314 \text{ кПа}$. Результати інтегрування представлені на відповідних епюрах на рис. 1б-ж.

II. Фізичне моделювання пластичної течії

Для емпіричного дослідження пластичної течії матеріалів при РККП в межах фізичного моделювання було виготовлено бандажований металевий роз'ємний штамп (рис. 1а) і металевий пуансон, причому ширина вхідного та вихідного каналів штампу $a=15 \text{ мм}$, кут між вхідним та вихідним каналами становить $2\theta=120^\circ$, а зовнішнє закруглення $\varphi=37^\circ$.

Із застосуванням розробленого штампу для РККП (рис. 1а) були одержані експериментальні залежності для тиску і швидкості пресування (рис. 3), де максимальний тиск пресування $P_{\text{макс}} = 310 \text{ кПа}$ (рис. 3а) при середній швидкості пресування $\langle V \rangle = 0,36 \text{ мм/с}$ (рис. 3б) добре узгоджується із максимальним теоретичним значенням (рис. 1ж).

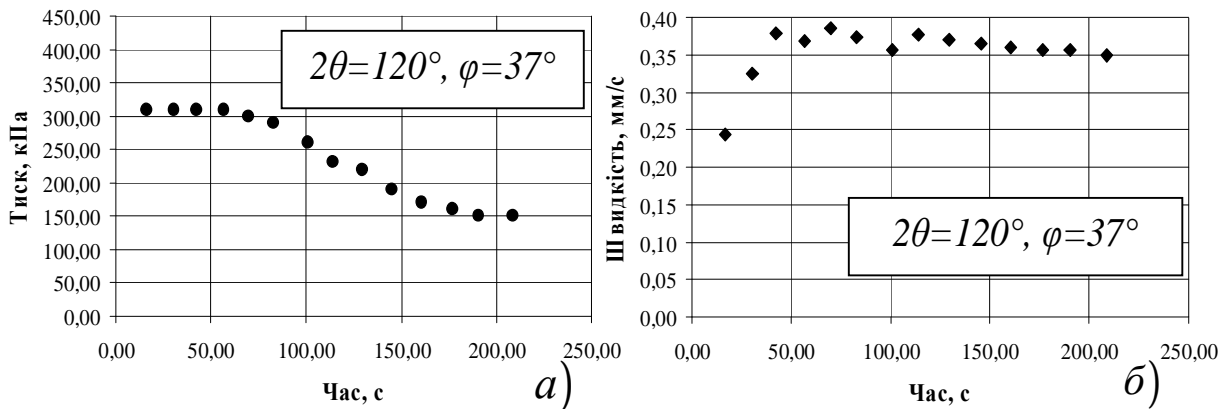


Рис. 3. Емпіричні залежності тиску (а) і швидкості (б) РККП для течії пластиліну.

Висновки і обговорення результатів

1. Запропонований гідродинамічний підхід дозволяє більш детально проаналізувати механіку процесу РККП. Фактично аморфні і полікристалічні матеріали за умов пластичного деформування можна розглядати як квазіньютонівські рідини з ефективною в'язкістю, яка враховує не тільки в'язке тертя, але і фрагментацію структури оброблюваного матеріалу. На рис. 1є в зоні осередку пластичного деформування можна помітити пік дотичних напружень, який характеризує велику неоднорідність

деформацій у об'ємі оброблюваного матеріалу, що може спричинити розтріскування заготовки.

2. Існування великих градієнтів швидкостей (рис. 1д) і дотичних напружень (рис. 1є) зумовлює відносний обертальний рух для зерен оброблюваного полікристалічного матеріалу і тим самим формує осередки турбулентності в зоні пластичного деформування матеріалу при РККП, що корелює із гіпотезою Я. Ю. Бейгельзімера [4].

3. Теоретично і експериментально показано можливість дослідження процесу РККП в'язких суцільних середовищ шляхом чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса, що дозволяє виконати коректну оцінку основних енергосилових параметрів

процесу, а також істотно прискорити і здешевити процес проектування технологічного устаткування для реалізації РККП у порівнянні з натурним фізичним моделюванням. Розроблена методика знайде подальше застосування для аналізу течії полімерів у штампах зі складною геометрією.

4. Результати розрахунків добре узгоджуються із даними експериментів.

Періг О.В. - асистент кафедри технічної механіки ДДМА;

Лаптев О.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Матеріалознавство, технологія і термічна обробка металів» ДДМА;

Голоденко М.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент ДонНАБА;

Подлесний С.В. – кандидат технічних наук, завідувач кафедри технічної механіки ДДМА;

Кох А.К. – студент ДДМА. .

- [1] Р. З. Валиев. Создание объемных наноструктурных материалов методами интенсивной пластической деформации для инновационных применений в технике и медицине // *Физика и техника высоких давлений*, **18** (4), сс. 12-20 (2008).
- [2] В. А. Белошенко, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин. *Твердофазная экструзия полимеров*. Наукова думка, К., 207 с. (2008).
- [3] V. M. Segal. Materials processing by simple shear // *Materials Science and Engineering A.*, **197**, pp. 157-164 (1995).
- [4] Я. Е. Бейгельзимер. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью // *Физика и техника высоких давлений*, **18** (4), сс. 77-86 (2008).
- [5] R. Manna, P. Agrawal, J. Sushant, B. K. Mudda, N. Mukhopadhyay, G. V. Sastry. Physical modeling of equal channel angular pressing using plasticine // *Scripta Materialia*, **53** (12), pp. 1357-1361 (2005).
- [6] О.М. Лаптев, О.В. Періг, М.Г. Литвинов, С.В. Подлесний. *Спосіб фізичного моделювання течії пластичних матеріалів*: патент № UA 41132 U: МПК (2009) B21J 5/00, G01N 3/28; власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u200812900; заявл. 05.11.08; опубл. 12.05.09, Бюл. № 9, 09 р. — 2 с. : 2 іл.
- [7] А.В. Періг, А.М. Лаптев, Н.Н. Голоденко, А.Ю. Лошманов, М.Г. Литвинов. Компьютерное моделирование течения материалов при равноканальном угловом прессовании: анализ движения вязкой среды и экспериментальная верификация методом маркеров // *Обработка материалов давлением: сб. наук. пр.*, Краматорськ: ДДМА, **20** (1), сс. 57-62 (2009).
- [8] П. Дж. Роуч. *Вычислительная гидродинамика*. Мир, М., 616 с. (1980).
- [9] H. Sofuoglu, J. Rasty. Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes // *Tribology International*, **33** (8), pp. 523-529 (2000).

A.V. Perig¹, A.M. Laptev¹, N.N. Golodenko², S.V. Podlesny¹, A.K. Kokh¹

Computer Prediction of Structural Transformations In Materials Subjected to Equal Channel Angular Extrusion

¹ Donbass State Engineering Academy, Shkadinova 72, 84313, Kramatorsk, Ukraine, 84313,
Tel. +38-095-169-57-35, e-mail olexander.perig@gmail.com

² Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzhavina 2,
86123, Makeevka, Ukraine, Tel. +38-066-240-91-27, e-mail nik_nik_Gold@mail.ru

The possibility of a preliminary calculation of structural transformations for the planar plastic flow of processed material during Equal Channel Angular Extrusion (ECAE) through a non-rectangular die with external rounding has been shown with a numerical solution of the Navier-Stokes equations. The optimal energy-power parameters, the characteristics of deformation nonuniformity, flow lines and the flow velocity fields have been studied. The legitimacy of an existing analogy between viscous liquid flow and polycrystalline plastic flow during ECAE has also been analyzed.

Key words: equal channel angular extrusion, Navier-Stokes equation, finite difference solution, physical simulation, plasticine