

УДК 621.7.043: 621.777.01: 53.072.22

Периг А. В.  
Романко С. Н.  
Роганов Л. Л.

## О СНИЖЕНИИ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ РОТАЦИИ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Дальнейшее развитие и коммерциализация технологических схем интенсивного пластического деформирования (ИПД) предъявляет новые повышенные требования как к спектру деформируемых материалов, так и к эффективности их обработки давлением [1]. В применении к процессам равноканального углового прессования (РКУП) отмеченные особенности приводят к формированию двух противоположных тенденций. С одной стороны имеет место постоянная разработка новых процессов ИПД посредством создания непрерывных схем бесконечного РКУП по типу «Конформ» [2–3], а также совершенствования штамповой оснастки изменением геометрии зон пересечения каналов и формы входных и выходных каналов угловых штампов [4–5]. С другой же стороны, целый ряд исследователей продолжают применять классические штампы Сегала (Segal) [1], Ивахаши (Iwahashi) [6] и Луиса-Переза (Luis Pérez) [7], но для острого угла  $2\theta < 90^\circ$  между пересекающимися каналами [8–9]. При обработке хрупких и малопластичных материалов осуществление РКУП в остроугольных штампах представляет собой очень жесткую схему деформирования с образованием больших застойных зон течений и формированием значительной макроскопической ротации в объемах заготовок [10–14]. Указанные факторы приводят к появлению значительных градиентов касательных напряжений и сдвиговых деформаций, вызывают формирование опасных сечений с исчерпанием ресурса пластичности и высокой вероятностью формирования макротрещин в объемах заготовок. При обработке высокопластичных материалов реализация РКУП в остроугольных штампах с  $2\theta < 90^\circ$  позволяет обеспечить быстрое накопление необходимых степеней деформаций и требуемых уровней измельчения структур при меньших числах проходов по выбранным технологическим маршрутам прессования [10–14]. Из вышесказанного следует, что общая технологическая проблема при осуществлении углового прессования заготовок в остроугольных штампах посредством использования деформирующих пуансонов прямоугольной формы состоит в формировании значительной отходной застойной зоны материала после каждого прохода деформирования, что существенно снижает выход годного материала, а также технологическую эффективность процессов РКУП в штампах с  $2\theta < 90^\circ$ .

Одним из путей решения отмеченной проблемы является варьирование формы деформирующего инструмента посредством применения профилированных пуансонов [15]–[20]. Подобные методики находят применение не только в рамках решения технологических задач объемной штамповки [15], штамповки поковок [16], холодной многопереходной штамповки [15–16], листовой штамповки [17], прошивки [18], обратного выдавливания [19], но и при совершенствовании деформационных процессов ИПД [20]. В известных работах [1]–[20] уделяется недостаточное внимание решению технологических проблем повышения выхода годного и снижения неравномерности деформаций для схем течения заготовок в равноканальных остроугольных штампах. Этим определяется актуальность настоящего исследования, посвященного количественному анализу и экспериментальной верификации эффектов влияния геометрии пуансона и формы переходной зоны сопряжения каналов штампов на характер и особенности деформирования металлических заготовок.

Целью работы является разработка технологических рекомендаций по повышению эффективности процессов РКУП в непрямоугольных штампах сегаловской геометрии с углами пересечения каналов  $60^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$  (рис. 1–4) посредством физического и численного моделирования влияния формы пуансона на основные деформационные и энергосиловые параметры процессов в рамках анализа пластического течения металлических заготовок.

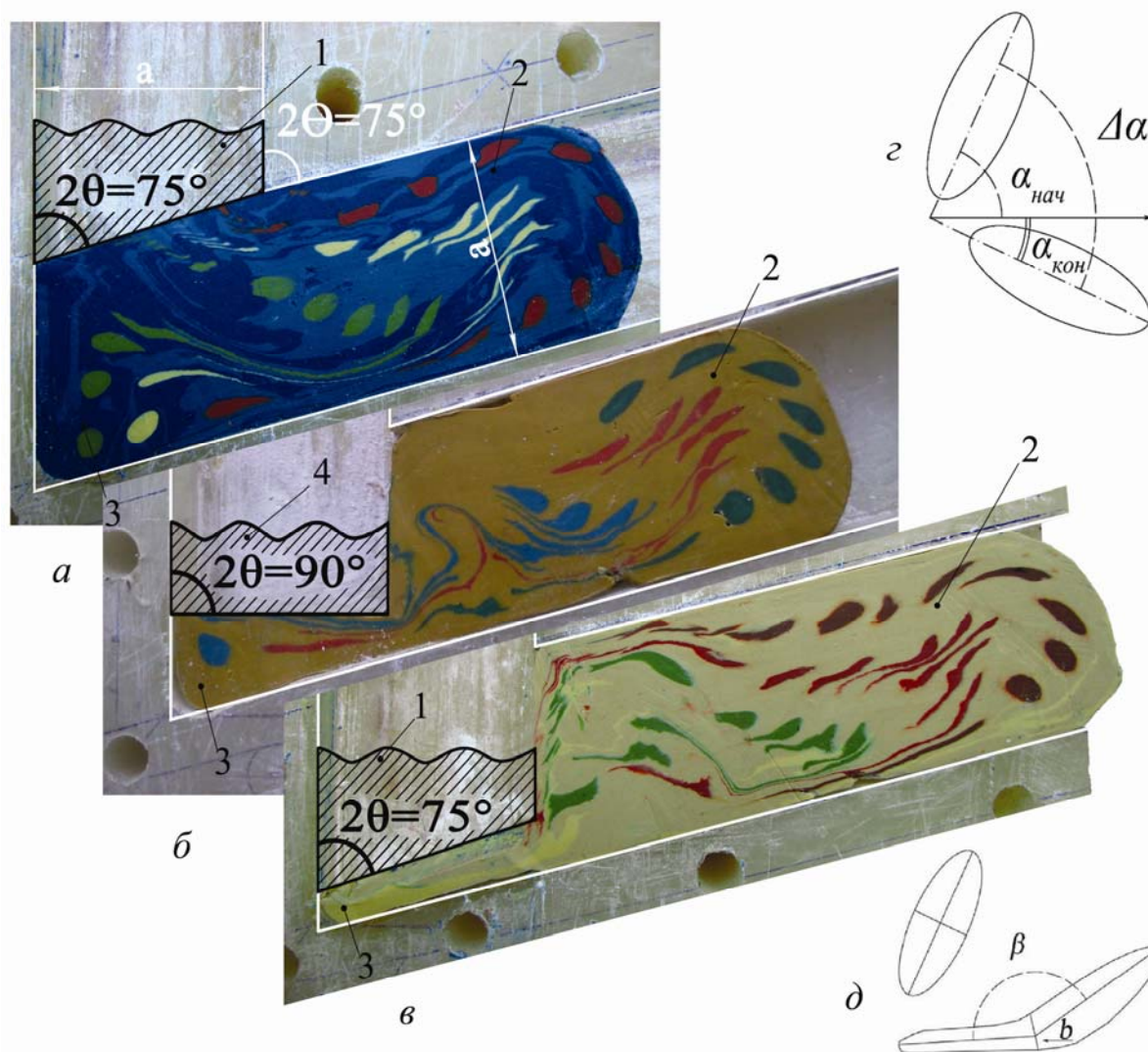


Рис. 1. Классическая (б) и модифицированная (а, в) схемы РКУП заготовок (2) с образованием застойной зоны (3) для течения через штамп с  $2\theta = 75^\circ$  при использовании прямоугольного (4, б) и скошенного (1, а, в)  $2\theta$ -пуансонов, а также качественные схемы формирования макроскопической ротации  $\Delta\alpha$  (г) и неоднородности поворота  $\langle \beta/b \rangle$  (д)

Поставленная задача о влиянии формы деформирующего пуансона на геометрические характеристики пластического течения заготовок (2) может быть решена экспериментально посредством выполнения пуансона не прямоугольной (4, рис. 1, б), а скошенной формы (1, рис. 1, а, рис. 1, в). Для физического моделирования особенностей течения заготовок при РКУП была изготовлена полимерная модель разъемного углового штампа с углом  $2\theta = 75^\circ$  между входным и выходным каналами, причем ширина каналов штампа составляет  $a = 40$  мм (рис. 1). Экспериментальный анализ динамики течения основывается на использовании методов исходных кольцевых сеток (рис. 1). Исходная кольцевая сетка формировалась сверлением сквозных отверстий диаметрами 4 мм в замороженной модели заготовки (2), которые заполнялись размягченным одноцветным материалом вдоль условных начальных вертикальных линий на рис. 1, причем масштаб исходной кольцевой сетки выбирался из условия расположения 3-х исходных кольцевых маркеров вдоль ширины  $a$  модели заготовки.

При этом для непрямоугольных штампов ( $60^\circ \leq 2\theta < 90^\circ$  либо  $90^\circ < 2\theta \leq 120^\circ$ , но  $2\theta \neq 90^\circ$ ) обязательным геометрическим условием является равенство между углом  $2\theta$  скоса деформирующего пуансона (1) и углом  $2\theta$  между пересекающимися каналами штампа (рис. 1). В рамках физического моделирования выполним экспериментальную оценку технологических потерь деформируемого материала (2) при классической схеме углового прессования на рис. 1, б. При осуществлении РКУП через остроугольный  $2\theta$ -штамп посредством

прямоугольного пуансона (4) на рис. 1, б за каждый проход деформирования происходят регулярные потери обрабатываемого материала (2), оказывающегося в застойной зоне (3) площадью  $S_{dead\ zone\ 1} = (1/2) \cdot (a^2) \cdot ctg(2\theta)$ , где  $a$  – ширина входного и выходного каналов штампа. При этом в схеме на рис. 1, б величина потерь материала составляет 5–6 % от исходного материала заготовки в каждом проходе РКУП, что не вполне рационально. Т. о. с применением методов физического моделирования на рис. 1 показано, что классическая схема равноканального углового прессования металлических изделий в остроугольных  $2\theta$ -штампах Сегала с применением стандартных деформирующих пуансонов (4) в виде прямоугольных параллелепипедов либо прямых круговых цилиндров (4, рис. 1, б) является недостаточно эффективной ввиду значительных технологических отходов и опасной для целостности материала макроскопической ротации, что требует разработки рациональных технологических рекомендаций по совершенствованию данной схемы ИПД.

В процессе выдавливания через остроугольный  $2\theta$ -штамп пресс-остатка заготовки (2) скошенным  $2\theta$ -пуансоном (1) для схемы течения на рис. 1в формируется меньшая застойная зона (3) с площадью  $S_{dead\ zone\ 2} \approx 0,1 \cdot (a^2) < S_{dead\ zone\ 1}$ . При этом для новой схемы течения на рис. 1, в величина технологических потерь уменьшается в 2 раза по сравнению с классической схемой углового прессования прямоугольным пуансоном (4) на рис. 1, б и не превышает 3 % от объема исходной заготовки (2) за каждый проход РКУП.

Под макроскопической ротацией  $\Delta\alpha$  деформируемого материала заготовки (2) при РКУП в  $2\theta$ -штампе, характеризующей степень «перемешивания» материала в объеме заготовки (2), будем понимать приращение угла  $\alpha$  (рис. 1, б, г) для двух последовательных положений эллиптического маркера  $\Delta\alpha = \alpha_{нач} - \alpha_{кон} = \alpha_j - \alpha_{j-1}$  [рад] (рис. 1, г) с направлением течения заготовки, т. е. с направлением наклонной нижней стенки выходного канала в  $2\theta$ -штампе на рис. 1, а–в. В качестве меры неоднородности поворота материала примем отношение угла  $\beta$ , характеризующего относительный перегиб частей эллипса, к ширине  $b$  эллиптического маркера в окрестности точки перегиба  $<\beta/b>$  [рад/мм] (рис. 1, д).

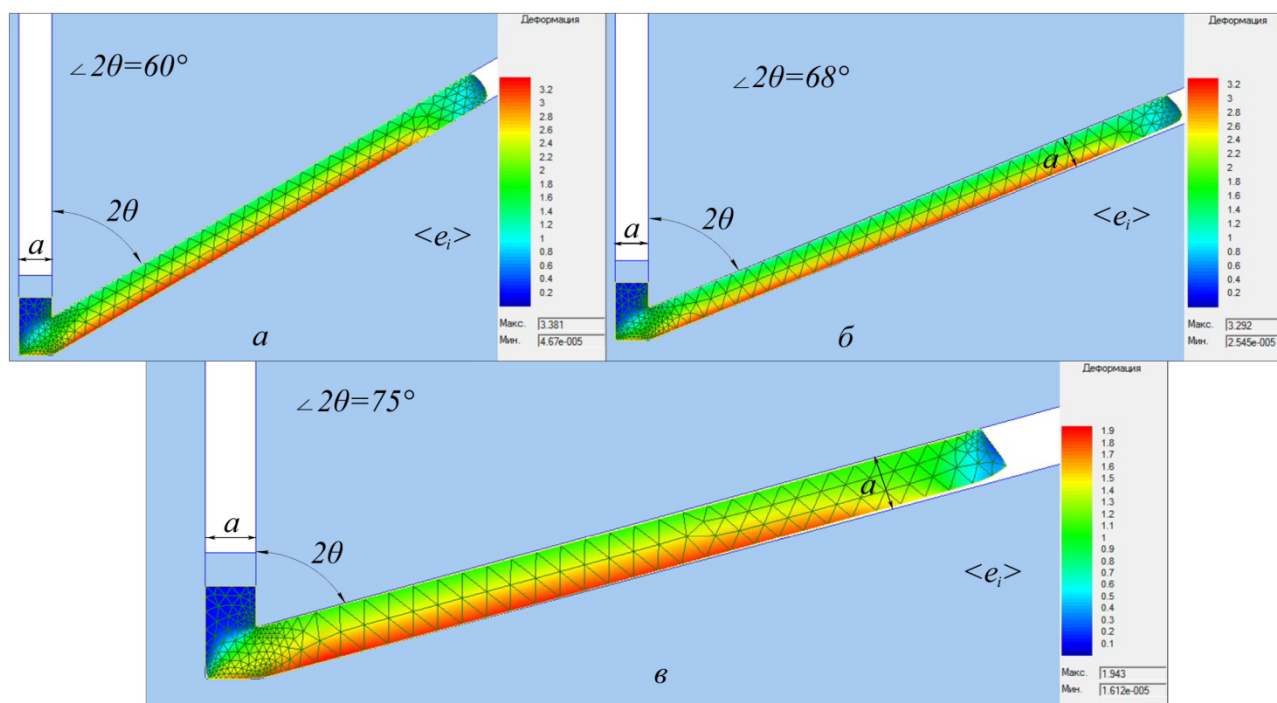


Рис. 2. МКЭ-модель течения заготовки из меди М1 через усеченный остроугольный  $2\theta$ -штамп при деформировании прямоугольным пуансоном

Оценим характер изменения углов  $\alpha$  и  $\Delta\alpha$ , которые показывают как текущее направление поворота, так и приращение направления поворота большой оси для каждого из эллиптических маркеров в выходном канале  $2\theta$ -штампа с направлением течения материала (2), т. е. по отношению к выходному каналу штампа. Для схемы на рис. 1, б имеем средневзвешенные



по всему объему модели значения  $\langle \alpha^{vol}_{\text{прям пуан}} \rangle = +0,054$  рад и  $\langle \Delta \alpha^{vol}_{\text{прям пуан}} \rangle = (-0,0011)$  рад, в то время как для оптимизированной схемы на рис. 1, а  $\langle \alpha^{vol}_{\text{скош пуан}} \rangle = (-0,108)$  рад и  $\langle \Delta \alpha^{vol}_{\text{скош пуан}} \rangle = (-0,0121)$  рад. При этом алгебраически выполняются неравенства  $\alpha^{vol}_{\text{скош пуан}} < \alpha^{vol}_{\text{прям пуан}}$  и  $\Delta \alpha^{vol}_{\text{скош пуан}} < \Delta \alpha^{vol}_{\text{прям пуан}}$ , которые дают численную иллюстрацию эффектов снижения макроскопической ротации при использовании скошенных пуансонов в рамках реализации процессов РКУП через остроугольные  $2\theta$ -штампы Сегала. Т. о. сравнительный экспериментальный анализ классической (рис. 1, б) и предлагаемой (рис. 1, а, рис. 1, в) схем деформирования в равноканальных  $2\theta$ -угловых штампах показывает, что наиболее рациональной для осуществления многопроходного РКУП является схема углового прессования на рис. 1, а, реализуемая посредством углового прессования деформируемой заготовки (2) скошенным  $2\theta$ -пуансоном в виде скошенного прямоугольного параллелепипеда (1) либо скошенного прямого кругового цилиндра (1) без формирования отходного пресс-остатка (3) материала заготовки (2).

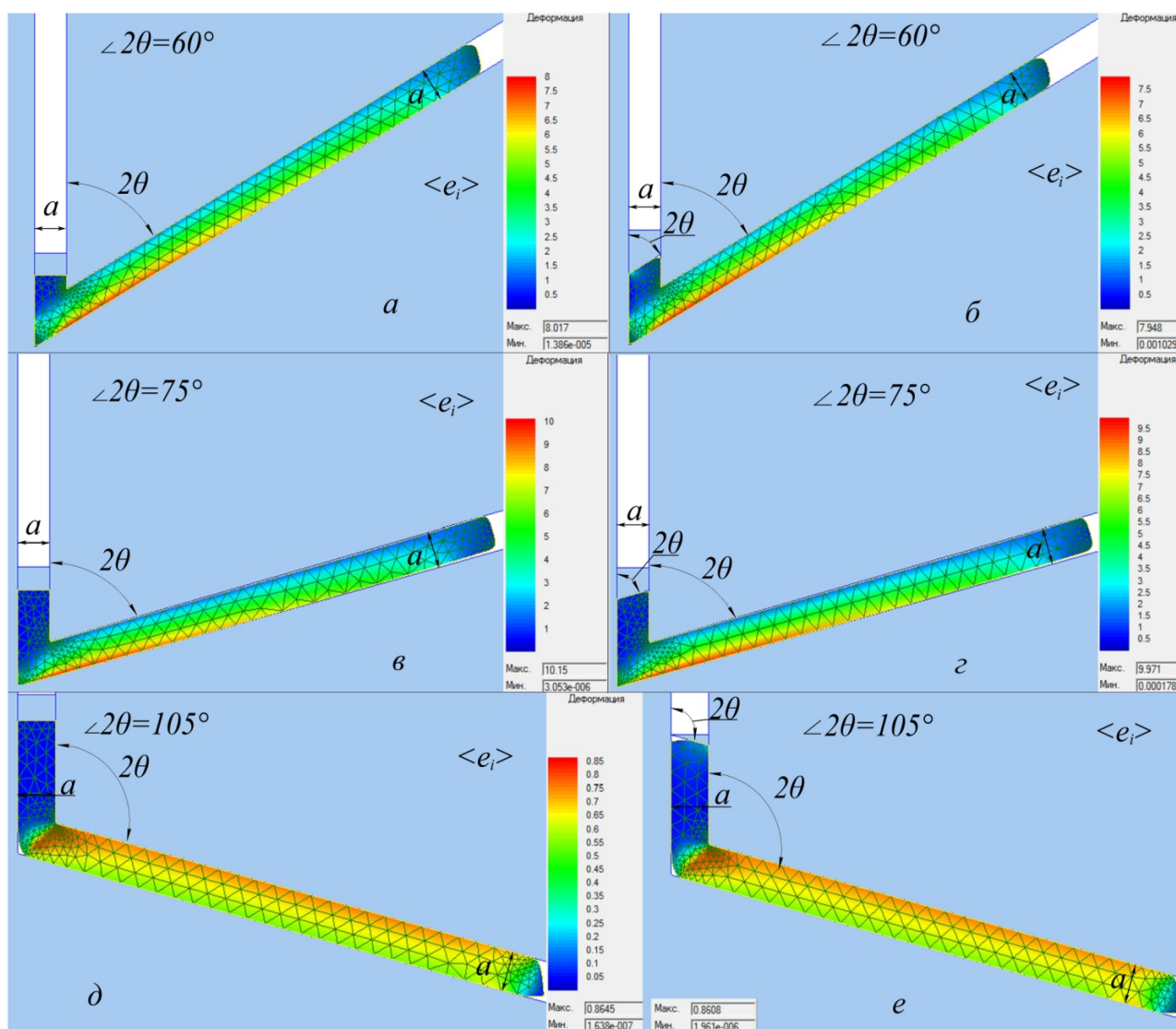
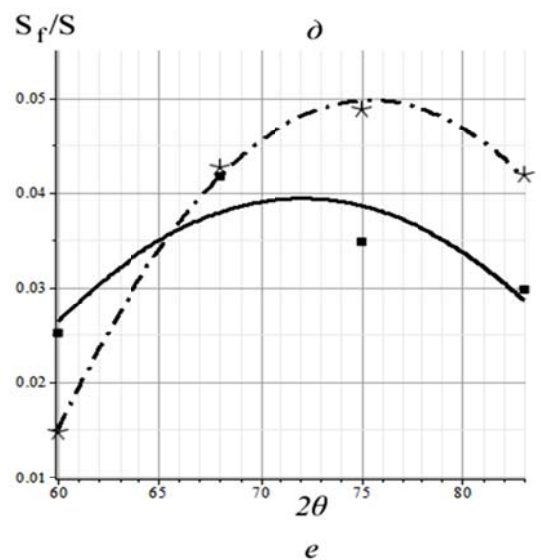
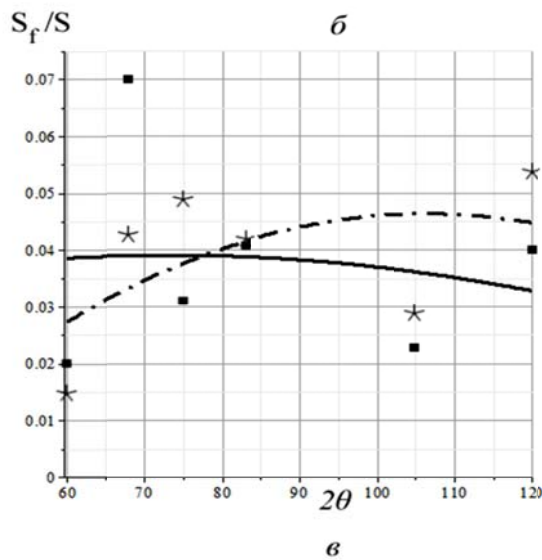
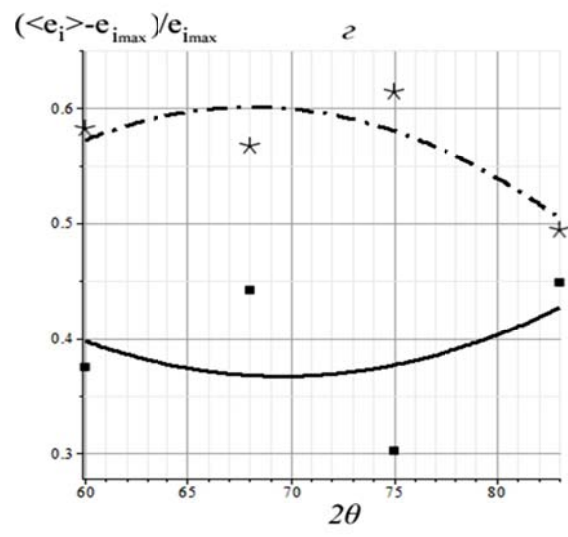
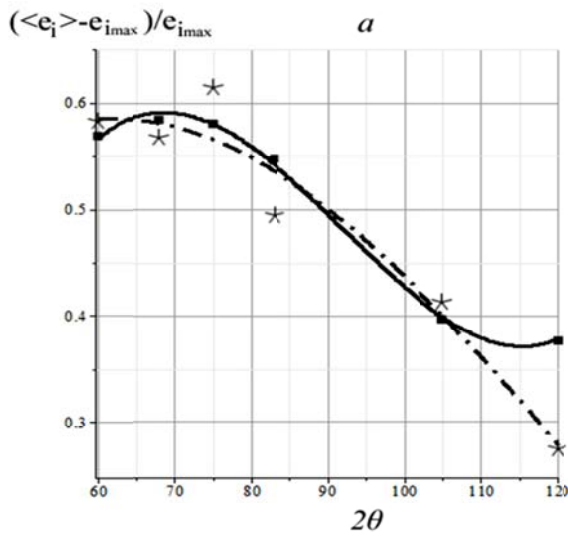
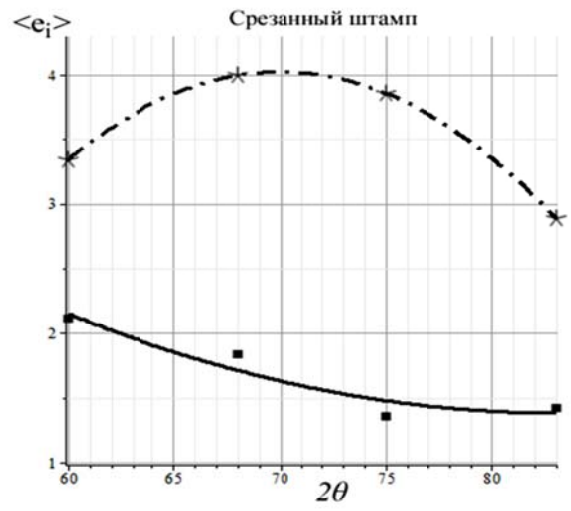
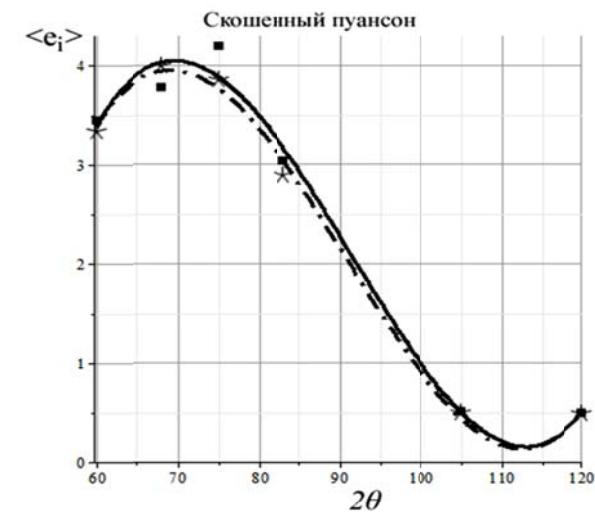


Рис. 3. Сравнительный анализ схем РКУП в  $2\theta$ -штампах при деформировании прямоугольными (а, в, д) и скошенными (б, г, е)  $2\theta$ -пуансонами

Для обобщения экспериментально установленных результатов (рис. 1) осуществим численное конечно-элементное (МКЭ, рис. 2–4) моделирование процессов РКУП в непрямоугольных штампах сегаловской геометрии с шириной входного и выходного каналов  $a = 35,4$  мм для углов пересечения каналов  $2\theta = \{60^\circ, 68^\circ, 75^\circ, 83^\circ, 105^\circ, 120^\circ\}$ .



★, - - - прямоугольный пуансон  
 ■, — — — скошенный пуансон

★, - - - прямоугольный пуансон  
 ■, — — — срезанный штамп

Рис. 4. Расчетные зависимости для интенсивностей  $\langle e_i \rangle$  (а, г) и неравномерностей (б, д) логарифмических деформаций  $((e_{i_{max}} - \langle e_i \rangle) / e_{i_{max}})$ , а также для относительной отходной площади носовой части заготовок  $S_f/S$  (в, е) при прессовании материала М1 через  $2\theta$ -штампы прямоугольным пуансоном (— ■ —, ★, а-е), через  $2\theta$ -штампы скошенным  $2\theta$ -пуансоном (— ■, а-в) и через усеченные  $2\theta$ -штампы (— ■, г-е) прямоугольным пуансоном

Целью применения МКЭ моделирования является сравнительный анализ режимов РКУП в  $2\theta$ -штампе для следующих трех случаев: I. прессование прямоугольным пуансоном – рис. 3 (а, в, д); II. прессование скошенным  $2\theta$ -пуансоном – рис. 3 (б, г, е); III. прессование в усеченном остроугольном  $2\theta$ -штампе прямоугольным пуансоном – рис. 2 (а–в). При этом усечение внешнего угла в зоне сопряжения пересекающихся каналов обеспечивается горизонтальной плоскостью, касательной к поверхности сферы с центром в вершине внутреннего угла и радиусом, равным ширине входного и выходного каналов – рис. 2 (а–в).

Для имитационного МКЭ моделирования применяется система QForm 2D (лицензия ДГМА № U1221). Рассматривается пластическое течение заготовок из меди М1 с относительными длинами  $L/a \leq 16,64$  без учета трения между заготовками и штампом,  $m = 0$ .

В рамках МКЭ моделирования было выполнено 16 расчетов процессов РКУП (рис. 2–4), причем сопротивление деформации для образцов из отожженной меди М1  $\sigma = 397,3\epsilon^{0,2}$  (МПа) было определено экспериментально посредством механических испытаний на растяжение, а для остальных механических параметров медных заготовок принимались следующие табличные значения: плотность  $\rho = 8960$  кг/м<sup>3</sup>, температура плавления  $t_{пл} = 1083$  °С, модуль упругости  $E = 110$  ГПа и коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

В рамках численного МКЭ моделирования на рис. 4, а–в было установлено, что применение скошенного пуансона (—■, ■) на рис. 1, а, в; рис. 3, б, г, е обеспечивает незначительное снижение максимальной интенсивности деформаций  $e_{imax}$  (рис. 4, а), причем среднее значение относительного расхождения результатов составляет 0,068.

При этом обеспечивается существенное уменьшение относительной площади  $S_{fore}/S$  отходной носовой части заготовки по сравнению со случаем деформирования материала прямоугольным пуансоном (—■, ★, в), а среднее относительное расхождение результатов составляет 0,174. Для штампов с углами  $85^\circ \leq 2\theta \leq 105^\circ$  применение скошенного пуансона (—■, ■) обеспечивает снижение неравномерности деформаций  $((e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax})$ , а среднее расхождение результатов для данного диапазона  $2\theta$  составляет 0,015.

Также установлено, что при осуществлении углового прессования посредством прямоугольного пуансона через усеченный сегаловский  $2\theta$ -штамп (—■, ■) на рис. 4 г–е обеспечивается как значительное снижение неравномерности деформаций (рис. 4, д) на 0,551, так и существенное уменьшение относительной площади  $S_{fore}/S$  отходной носовой части заготовки (рис. 4, е) на 0,225 по сравнению со случаем деформирования материала через стандартный неусеченный сегаловский  $2\theta$ -штамп (—■, ★).

Результаты численного моделирования на рис. 4 показывают, что осуществление углового прессования металлического изделия посредством прямоугольного пуансона через остроугольный усеченный сегаловский  $2\theta$ -штамп является более эффективным по снижению интенсивности (на 56 %) и неравномерности (на 33 %) деформаций, а также по уменьшению величины отходной носовой части заготовки (на 10 %) в сравнении с деформированием заготовки скошенным  $2\theta$ -пуансоном через стандартный неусеченный сегаловский  $2\theta$ -штамп.

## ВЫВОДЫ

В рамках снижения технологических отходов при угловом прессовании в работе количественно установлена целесообразность деформирования металлических изделий в непрямоугольных  $2\theta$ -штампах посредством применения пуансонов со скошенными кромками, причем с обязательным выполнением геометрического условия, что угол скоса  $2\theta$ -кромки пуансона равен углу  $2\theta$  между каналами остроугольного равноканального  $2\theta$ -штампа. Показано, что проблему по снижению отходов материала заготовок при РКУП наиболее эффективно можно решить осуществлением РКУП с применением стандартных деформирующих пуансонов в виде прямоугольных параллелепипедов либо прямых круговых цилиндров через усеченный остроугольный  $2\theta$ -штамп. В то же время конструктивная реализация усеченной штамповой оснастки может оказаться затруднительной. В таких случаях целесообразно рекомендовать осуществление углового прессования металлических изделий через остроугольный  $2\theta$ -штамп Сегала посредством скошенного  $2\theta$ -пуансона.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferrasse S. Scale up and application of equal-channel angular extrusion for the electronics and aerospace industries / S. Ferrasse et al. // *Materials Science and Engineering : A.* – 2008. – Vol. 493. – № 1–2. – P. 130–140.
2. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform / G. J. Raab, R. Z. Valiev, T. C. Lowe, Y. T. Zhu // *Materials Science and Engineering A.* – 2004. – Vol. 382. – P. 30–34.
3. Saray O. Principles of Equal-Channel Angular Sheet Extrusion (Ecase): Application to IF-Steel Sheets / O. Saray, G. Purcek, I. Karaman // *Reviews on Advanced Materials Science.* – 2010. – Vol. 25, No. 1. – P. 42–51.
4. Mathieu J.-P. A new design for equal channel angular extrusion / J.-P. Mathieu, S. Suwas, A. Eberhardt et al. // *Journal of materials processing technology.* – 2006. – Vol. 173. – No. 1. – Pp. 29–33.
5. 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 : сб. науч. пр. – Краматорськ : ДДМА.* – 2011. – № 2 (27). – С. 23–29.
6. Furukawa M. Review. Processing of metals by equal-channel angular pressing / M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon // *Journal of Materials Science.* – 2001. – Vol. 36. – P. 2835–2843.
7. Luis Pérez C. J. Upper bound analysis and FEM simulation of equal fillet radii angular pressing / C. J. Luis Pérez // *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* – 2004. – Vol. 12. – P. 205–214.
8. Nagasekhar A. V. Optimal tool angles for equal channel angular extrusion of strain hardening materials by finite element analysis / A. V. Nagasekhar et al. // *Computational Materials Science.* – 2004. – Vol. 30. – P. 489–495.
9. Nagasekhar A. V. Effect of acute tool-angles on equal channel angular extrusion/pressing / A. V. Nagasekhar et al. // *Materials Science and Engineering A.* – 2005. – Vol. 410–411. – P. 269–272.
10. Моделирование процесса равноканального углового прессования: двухпараметрический анализ методом жестких блоков и экспериментальная верификация методом кольцевых сеток / А. В. Периг и др. // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА,* 2009. – № 2 (21). – С. 40–45.
11. Численное математическое моделирование основных показателей качества при равноканальном угловом прессовании на основе решения уравнения переноса вихря / А. В. Периг, Н. Н. Голоденко и др. // *Обработка материалов давлением : сб. науч. пр. – Краматорск : ДДМА,* 2010. – № 1 (22). – С. 70–76.
12. Формирование макроротора при равноканальном угловом прессовании вязкого материала в остроугольном штампе / [А. В. Периг и др.] // *Краевые задачи и математическое моделирование : тематич. сб. науч. ст. : в 3 т. Т. 1. – Новокузнецк,* 2010. – С. 140–149.
13. Периг О. В. Фізичне моделювання рівноканальної кутової екструзії полімерів / О. В. Периг, М. М. Голоденко, І. І. Бойко // *Хімічна промисловість України.* – 2012. – № 4 (111). – С. 47–53.
14. 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.
15. Кутяйкин В. Г. Анализ микроструктуры заготовок в очаге деформации при вдавливании пуансона с плоским торцем / В. Г. Кутяйкин, О. В. Кутяйкин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* – 2007. – № 5. – С. 11–16.
16. Криволапов С. В. Исследование распределения волокон макроструктуры при штамповке поковок колец подшипников [Электронный ресурс] / С. В. Криволапов // *Журнал «Наука и образование»: электронное НТИ.* – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2008. – № 9. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/104014.html>.
17. Марцинюк О. Б. Виброобработка деформирующим инструментом при разделительных операциях листовой штамповки / О. Б. Марцинюк, В. В. Драгобецкий, А. Г. Маркевич // *Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського : збірник наукових праць Кременчуцького державного політехнічного університету.* – Кременчук : КДПУ, 2009. – Вип. 1 (54). – Ч. 1 – С. 42–45.
18. Зиганишин Р. Ф. Особенности пластического течения металла при прошивке пуансонами с различной формой торца / В. Г. Шибаков, Д. Л. Панкратов, Р. Ф. Зиганишин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением.* – № 10. – 2010. – С. 29–35.
19. Al-Saady M. H. Evaluation of New Hypothetical Concept (LHSIR) for Punch Profile Design for Indirect Extrusion of Hollow Rods / M. H. Al-Saady, K. M. K. Al-Saify, Y. F. Al-Abdullah // *European Journal of Scientific Research.* – 2010. – Vol. 44, No. 2. – P. 188–203.
20. Спосіб рівноканального кутового пресування [Текст] : патент № UA 59318 U: МПК (2006) B21D 28/14, B21J 5/00 / Периг О. В., Бойко І. І., Бондаренко Є. О., Глушко О. С. ; власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201012690 ; заявл. 26.10.10 ; опубл. 10.05.11, Бюл. № 9, 11 р. – 2 с. : 1 іл.

Периг А. В. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. АПП ДГМА;

Романко С. Н. – студент ДГМА;

Роганов Л. Л. – д-р техн. наук, проф. каф. МТО ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: olexander.perig@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.11.2012 г.