

УДК 539.89: 621.7.043: 621.77: 621.777.01

Периг А. В.
Паламарчук В. А.
Ткаченко Я. Ю.
Михеенко Д. Ю.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА В ПРОЦЕССЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Процессы равноканального углового прессования (РКУП) находят широкое промышленное применение в металлургии и машиностроении для интенсивного пластического деформирования металлов, сплавов, композитов, порошковых и полимерных полуфабрикатов [1–7]. Данные процессы характеризуются существенным влиянием механических характеристик материалов и геометрических параметров инструмента на кинематические и силовые параметры пластического течения [1–7]. Подавляющее количество работ в области РКУП сосредоточено на исследованиях особенностей формирования заданной микроструктуры материала и не уделяют должного внимания другим показателям качества [3–7]. В тоже время РКУП характеризуется значительной неравномерностью деформированного состояния, что приводит к неоднородности структуры в объеме деформируемого материала и обуславливает формирование краевых участков с нестационарным пластическим течением [1–8]. Ранее нами показано, что в месте пересечения каналов штампа образуется застойная зона, в объеме деформируемой заготовки формируется макроротор, что в результате приводит к уменьшению длин участков стационарного пластического течения и повышению технологических отходов материала [9–13]. Как результат, после осуществления необходимого количества проходов по определенному маршруту деформирования остается до 30 % первоначальной длины заготовки, а остальной материал выбраковывается в технологические отходы, что существенно усложняет промышленное применение процессов РКУП и требует основательного анализа как деформированного состояния обрабатываемых заготовок, так и геометрических особенностей пластического течения материалов в угловых штампах.

Следует отметить, что применение противодействия при РКУП приводит к нарушению схемы простого сдвига при пластическом течении материалов. Поэтому большинство исследователей процессов интенсивного пластического деформирования устраняют противодействие в выходном канале углового штампа. Разумеется, что отсутствие противодействия способствует возникновению краевого (концевого) эффекта, связанного с формированием нестационарного начального участка при пластическом течении заготовки, который регулярно отсекается после каждого прохода РКУП.

Таким образом, малоизученность задач снижения технологических отходов материала и влияния искажения формы начального участка заготовки на энергосиловые и деформационные параметры процессов РКУП обуславливает актуальность данной работы.

Целью работы является определение рациональных значений радиусов внешнего и внутреннего закруглений в зоне пересечения входного и выходного каналов углового штампа, обеспечивающих повышение качества изделий и снижение технологических отходов с учетом влияния краевого (концевого) эффекта на выход годного при РКУП.

Для учёта искажения формы начального участка заготовки и неравномерности распределения деформаций по сечению обрабатываемой заготовки выполнялось конечно-элементное моделирование (МКЭ моделирование) процессов РКУП в среде QForm-2D [14] (лицензия ДГМА № U1221). На рис. 1, а представлена расчетная схема модели штампа с углом $2\theta = 90^\circ$ между входным и выходным каналами, шириной каналов $a = 35,4$ мм, а также радиусами внешнего R и внутреннего r закруглений ($1 \text{ мм} \leq R, r \leq 70 \text{ мм}$, $0,03 \leq R/a, r/a \leq 1,98$). Рассматривается пластическое течение заготовок из меди М1 длиной L ($136 \text{ мм} \leq L \leq 589 \text{ мм}$, $3,84 \leq L/a \leq 16,64$) без учета трения между заготовками и штампом, $m = 0$. В рамках МКЭ

моделирования было выполнено 18 расчетов процессов РКУП в программе QForm-2D, причем сопротивление деформации для образцов из отожженной меди М1 $\sigma = 397,3\varepsilon^{0,2}$ (МПа) было определено экспериментально посредством механических испытаний на растяжение, а для остальных механических параметров медных заготовок принимались следующие табличные значения: плотность $\rho = 8960$ кг/м³, температура плавления $t_{пл} = 1083$ °С, модуль упругости $E = 110$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Т.о. каждый из процессов РКУП медных заготовок через 18 моделируемых штампов характеризуется определенными длиной L заготовки, а также параметрами внешнего R и внутреннего r закруглений штампа в зоне пересечения каналов (рис. 1).

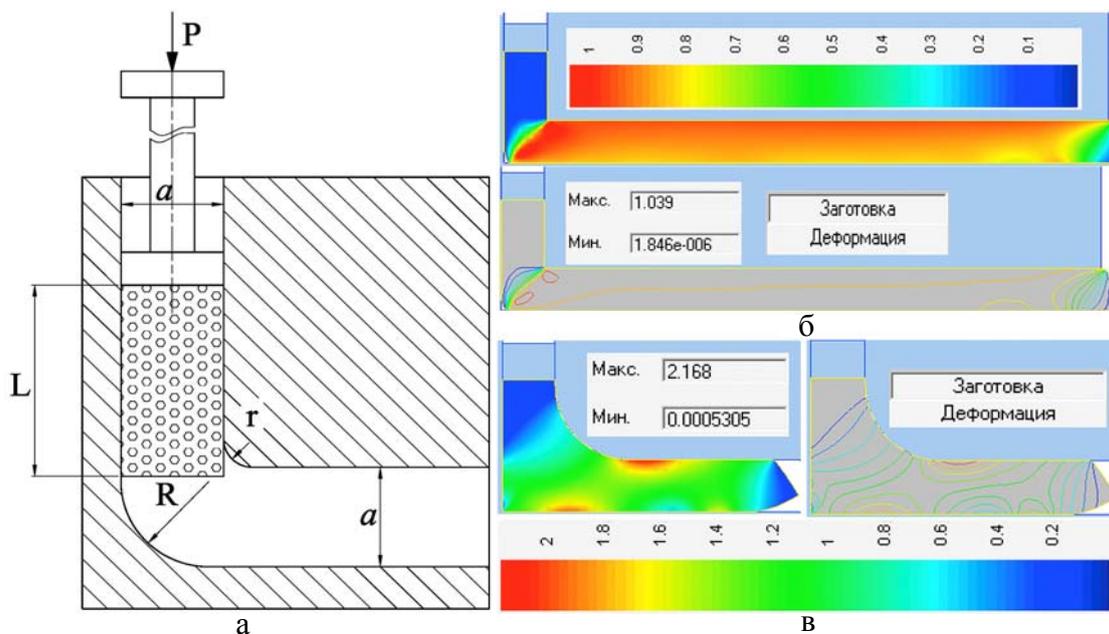


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования процесса РКУП через штамп с углом $2\theta = 90^\circ$ и радиусами R и r (а), конечно-элементные эпюры интенсивности логарифмических деформаций, полученные с применением среды QForm-2D для РКУП заготовок из меди М1 через штампы с шириной каналов $a = 35,4$ мм для $R = r = 1$ мм (б) и $R = 1$ мм, $r = 50$ мм (в)

В результате проведенных 18 расчетов были получены 18 расчетных эпюр (рис. 1, б, в) для распределения интенсивности деформаций по площади деформируемой заготовки. Для расчета усредненной интенсивности логарифмических деформаций для каждой расчетной эпюры воспользуемся аналогией между средней интенсивностью деформаций $\langle e_i \rangle$ по площади заготовки и координатой центра тяжести плоской фигуры:

$$\langle e_i \rangle = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta S_k \cdot (e_i)_k}{S}, \quad (1)$$

где ΔS_k – площадь криволинейной зоны между соседними изолиниями на МКЭ эпюре интенсивности логарифмических деформаций, $(e_i)_k$ – средняя интенсивность логарифмических деформаций в криволинейной зоне ΔS_k между соседними изолиниями, а S – площадь всей модели заготовки. В формуле (1) площади и определяются в системе AutoCAD Student с использованием команд Region и Massprop (рис. 1, б, в).

Будем искать зависимость между геометрическими параметрами штампа для РКУП и размером заготовки в соответствии со статистическим методом, который предложен и обоснован в [15] и заключается в построении определенного критериального уравнения:

$$\langle e_i \rangle = f(R/a, r/a, L/a), \quad (2)$$

где $R/a, r/a$ – безразмерные радиусы внешнего и внутреннего закруглений штампа в зоне пересечения каналов; L/a – безразмерная длина деформируемой заготовки (рис. 1, а).

Зависимость (2) преобразуем к математической модели в виде степенного одночлена:

$$\langle e_i \rangle = a_0 \cdot (R/a)^{a_1} \cdot (r/a)^{a_2} \cdot (L/a)^{a_3}, \quad (3)$$

где регрессионные коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 и a_3 вхождения в математическую модель (3) определяются в среде R [16] в соответствии с алгоритмом Левенберга – Марквардта (Levenberg – Marquardt algorithm, LMA) [16]. В данном случае расчетные значения регрессионных коэффициентов для доверительного интервала 95 % (уровень значимости $\alpha = 0,05$) имеют значения: $a_0 = 1,367317$, $a_1 = -0,143009$, $a_2 = 0,060383$ и $a_3 = -0,394327$. Т. о. степенное соотношение (3) принимает следующий вид:

$$\langle e_i \rangle = 1,367317 \cdot (R/a)^{-0,143009} \cdot (r/a)^{0,060383} \cdot (L/a)^{-0,394327}. \quad (4)$$

На рис. 2 приведено расчетное семейство кривых, построенных согласно степенному регрессионному соотношению (4).

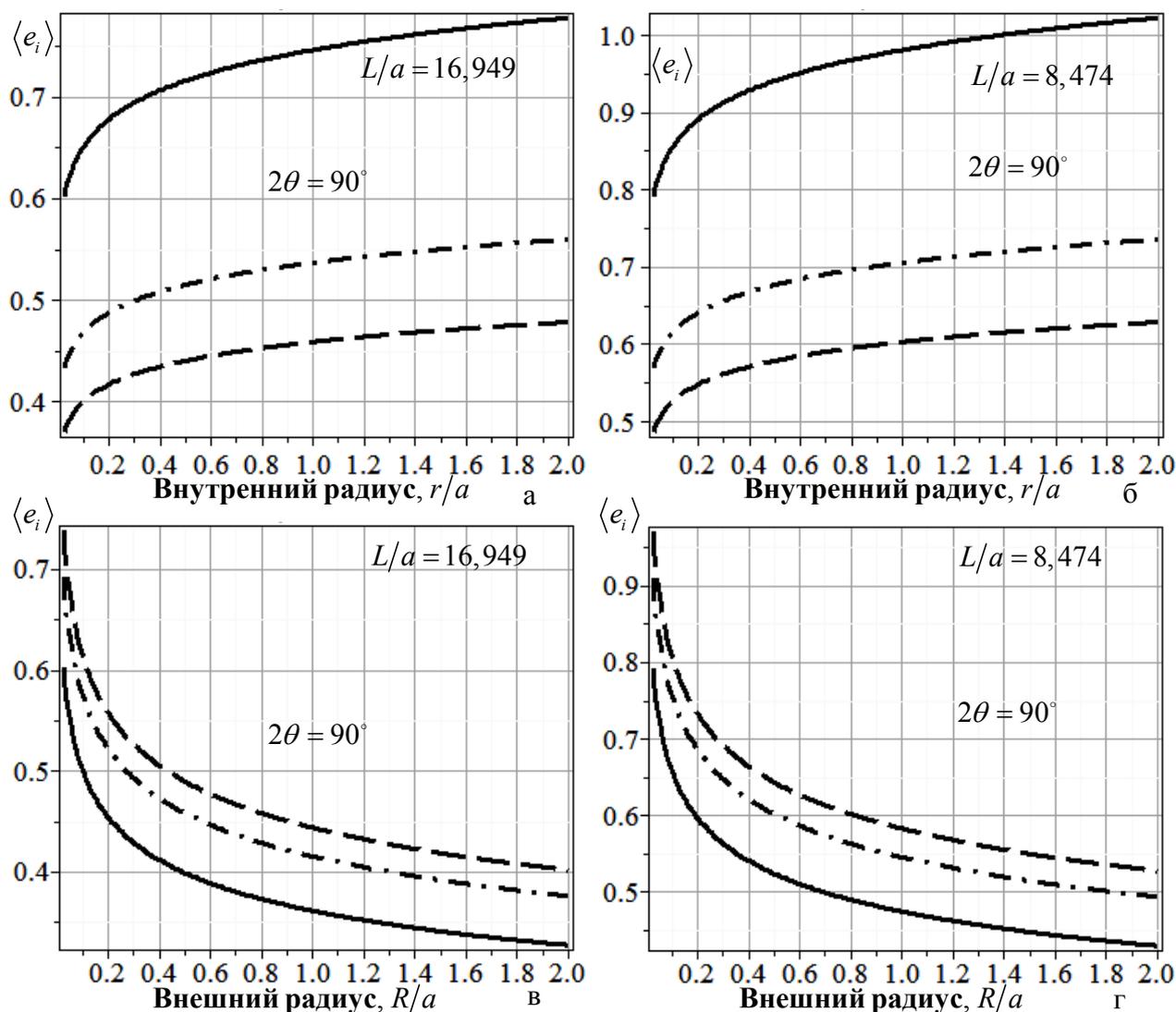


Рис. 2. Графики зависимости усредненной интенсивности деформаций $\langle e_i \rangle$ при РКУП заготовок из меди М1 для относительных длин заготовки $L/a=16,949$ (а, в) и $L/a = 8,474$ (б, г), причем (а, б) построены для $R/a = 0,028$ (—), $R/a = 0,282$ (—■—) и $R/a = 0,847$ (—·—), а зависимости (в, г) показаны для $r/a = 0,028$ (—), $r/a = 0,282$ (—■—) и $r/a = 0,847$ (—·—)

Оценка адекватности степенного соотношения (4) осуществляется косвенным методом, посредством анализа остатков, т. е. разностей между действительными значениями усредненной интенсивности логарифмических деформаций $\langle e_i \rangle$, рассчитанными в системе

QForm-2D, и значениями $\langle e_i \rangle$, предсказываемыми математической моделью (3)–(4). В случае адекватности регрессионного соотношения (4), распределение остатков имеет нормальный характер [17–18]. Для соотношения (4) суммы Пирсона имеют значения $\chi^2_{набл} = 10,980$ и $\chi^2_{крит} = 15,086$ и поскольку $\chi^2_{набл} < \chi^2_{крит}$, то нет оснований отклонить гипотезу о нормальном распределении регрессионных остатков, что свидетельствует об адекватности модели (4).

Регрессионное соотношение для неравномерности распределения логарифмических деформаций при РКУП имеет следующий вид:

$$\left(e_{i_{max}} - \langle e_i \rangle \right) / e_{i_{max}} = 0,789298 \cdot (R/a)^{0,007947} \cdot (r/a)^{0,128643} \cdot (L/a)^{-0,150511}. \quad (5)$$

Результаты математической модели (5) приведены на рис. 3.

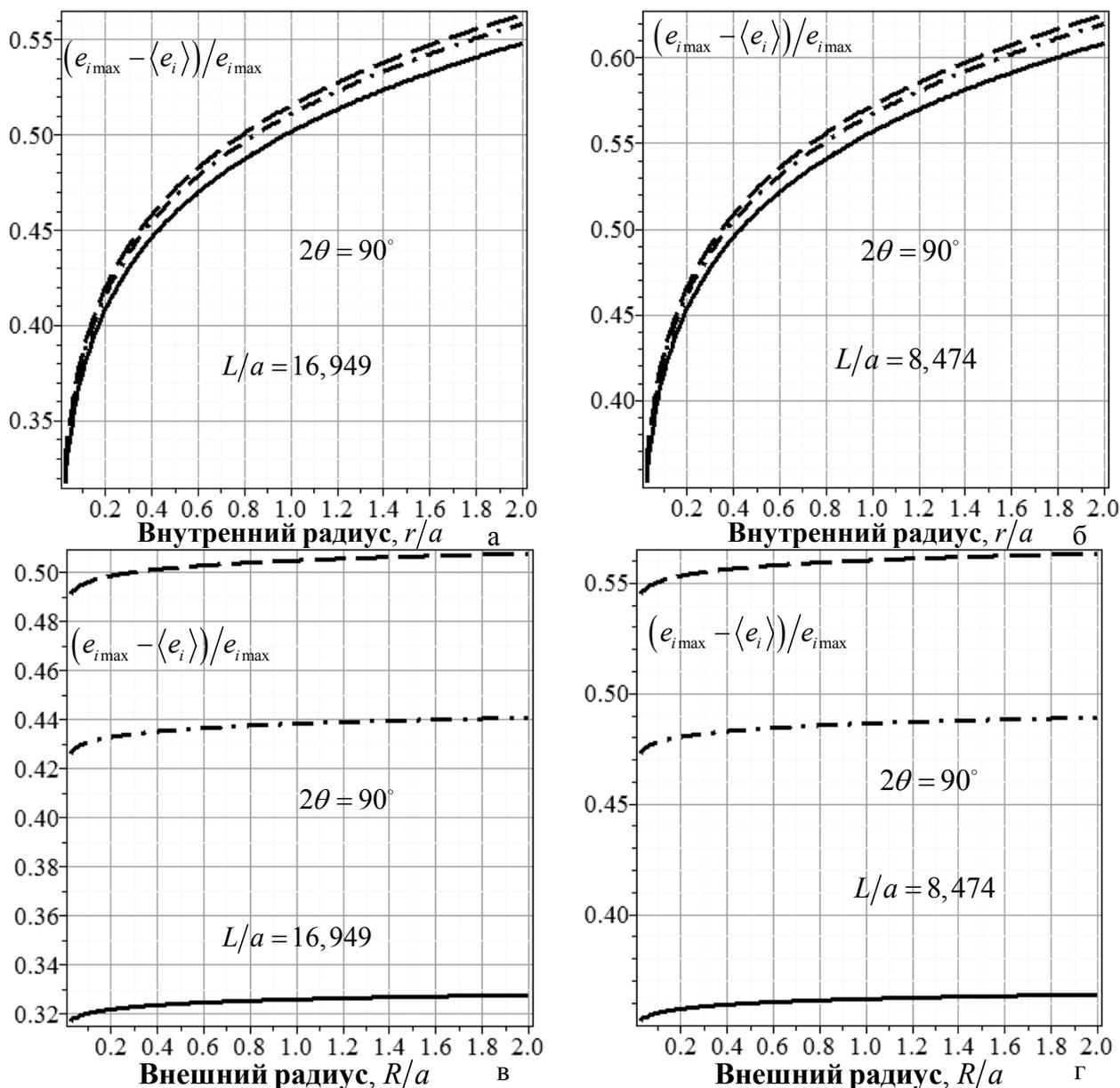


Рис. 3. Графики зависимости неравномерности деформаций $(e_{i_{max}} - \langle e_i \rangle) / e_{i_{max}}$ при РКУП заготовок из меди М1 для относительных длин заготовки $L/a = 16,949$ (а, в) и $L/a = 8,474$ (б, г), причем (а, б) построены для $R/a = 0,028$ (—), $R/a = 0,282$ (—■—) и $R/a = 0,847$ (— —), а зависимости (в, г) показаны для $r/a = 0,028$ (—), $r/a = 0,282$ (—■—) и $r/a = 0,847$ (— —)

Геометрический аналог технологического отхода материала для разных схем РКУП можно охарактеризовать величиной относительной площади начального нестационарного

участка заготовки S_{fore}/S , который регулярно усекается после каждого прохода и характеризует наличие краевого (концевого) эффекта. Регрессионное соотношение для относительной площади непроработанной носовой части заготовки имеет вид:

$$S_{fore}/S = 0,573155 \cdot (R/a)^{0,129657} \cdot (r/a)^{-0,036096} \cdot (L/a)^{-0,939552} \quad (6)$$

Численные результаты степенной модели (6) приведены на рис. 4.

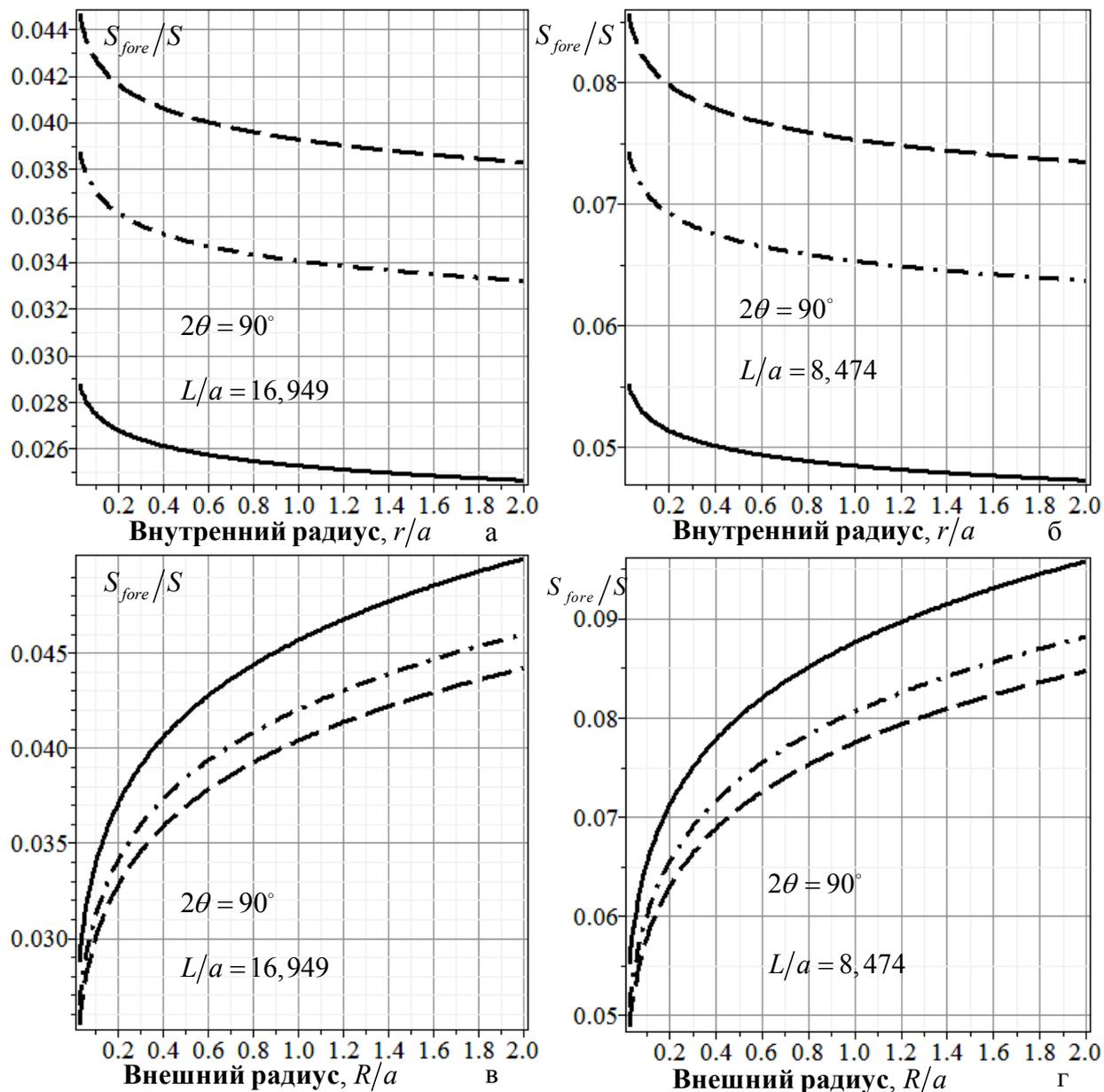


Рис. 4. Графики зависимости относительной площади нестационарного участка заготовки S_{fore}/S при РКУП меди М1 для длин заготовки $L/a = 16,949$ (а, в) и $L/a = 8,474$ (б, г), причем (а, б) построены для $R/a = 0,028$ (—), $R/a = 0,282$ (---) и $R/a = 0,847$ (-·-·-), а зависимости (в, г) показаны для $r/a = 0,028$ (—), $r/a = 0,282$ (---) и $r/a = 0,847$ (-·-·-)

Следует отметить, что в рамках данной работы моделирование краевого эффекта при РКУП основывается как на применении МКЭ, так и на использовании регрессионного анализа. Поэтому общие закономерности течения, представленные на рис. 2–4, справедливы для внешнего и внутреннего радиусов углового штампа, находящихся в пределах $0,03 \leq R/a, r/a \leq 1,98$ и для длин заготовки $3,84 \leq L/a \leq 16,64$.

Результаты моделирования (рис. 2–4) показывают, что с увеличением внутреннего радиуса штампа r/a происходит возрастание средней интенсивности деформаций $\langle e_i \rangle$, в тоже

время увеличивается неравномерность деформации заготовки $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ и при этом происходит уменьшение нестационарной площади S_{fore}/S . По мере увеличения внешнего радиуса штампа R/a происходит уменьшение интенсивности деформаций $\langle e_i \rangle$, медленное возрастание неравномерности $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ и быстрое возрастание площади S_{fore}/S нестационарного участка. С уменьшением длины заготовки L/a возрастает интенсивность деформаций $\langle e_i \rangle$, нарастает неравномерность деформации $(e_{imax} - \langle e_i \rangle) / e_{imax}$ и быстро увеличивается технологический отход вследствие возрастания площади нестационарного участка заготовки, что показывает целесообразность РКУП более длинных заготовок.

Совместный анализ (4)–(6) показывает, что радиус внешнего закругления штампа для РКУП в зоне сопряжения каналов штампа должен быть минимальным $R/a = 0,028$, а внутренний радиус должен находиться в пределах $0 \leq r/a \leq 0,3$. Для заготовок с $L/a = 8,474$ указанные значения технологических радиусов обеспечивают достижение высокой интенсивности деформаций $0,79 \dots 0,91$ при низкой неравномерности деформаций $0,35 \dots 0,48$ и технологическом отходе начального нестационарного участка заготовки $0,055 \dots 0,051$ за один проход углового прессования меди М1 через штамп с $2\theta = 90^\circ$. В тоже время для заготовок с $L/a = 16,949$ при $R/a = 0,028$ и $0 \leq r/a \leq 0,3$ имеет место достижение интенсивности деформаций $0,60 \dots 0,69$ при более низкой неравномерности деформаций $0,317 \dots 0,429$ и незначительном технологическом отходе начального нестационарного участка заготовки $0,029 \dots 0,026$ за один проход углового прессования меди М1 через штамп с $2\theta = 90^\circ$.

Численные решения для РКУП заготовок из меди М1 без трения через штампы с $2\theta = 90^\circ$ выявили, что при увеличении относительной длины заготовки L/a от 8,5 до 17 имеет место уменьшение в 1,92 раза относительной площади отходной носовой части от 0,0504 до 0,0263, снижение в 1,31 раза взвешенной интенсивности деформаций от 0,912 до 0,694 наряду со снижением неравномерности деформаций в 1,11 раза от 0,476 до 0,429.

Сформулированные рекомендации по угловому прессованию более длинных заготовок сталкиваются с необходимостью последующего анализа возможной потери устойчивости при деформировании относительно длинных стержней в угловых штампах с малыми длинами входного и выходного каналов, что требует дальнейших исследований краевого эффекта в процессах РКУП.

ВЫВОДЫ

Теоретически с использованием конечно-элементного моделирования и регрессионного анализа выполнен учет краевых эффектов при РКУП материалов, что позволило расширить представления о характере влияния внешнего и внутреннего радиусов углового штампа, а также длины деформируемой заготовки на величину искажения формы начального участка и неравномерность распределения деформаций по сечению заготовки. Результаты расчетов позволяют оценить усредненную по объему заготовки интенсивность логарифмических деформаций для штампов различной геометрии с учетом влияния конечной ограниченной длины реальной деформируемой заготовки. Полученные результаты позволяют рекомендовать режимы углового прессования с минимальными технологическими отходами деформируемого материала. Полученные регрессионные модели дают обоснование экспериментально установленному факту целесообразности деформирования более длинных заготовок при угловом прессовании с целью снижения технологических отходов деформируемого материала.

Предложенная статистическая методика найдет дальнейшее применение для описания закономерностей пластического, вязкопластического и упруго-вязкопластического течений металлических, композитных, порошковых и полимерных заготовок при РКУП в угловых штампах простой (Segal) и сложной (Iwahashi, Luis Pérez) геометрии. Представляется перспективным применение данной методики к анализу течения материалов в многоугловых, конфузорных штампах и штампах с параллельными скосами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование равноканального углового прессования пористых заготовок / Майданюк А. П., Штерн М. Б., Багнюк Г. А., Рябичева Л. А. // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 31–36.

2. Анализ процессов равноканального углового прессования и угловой гидроэкструзии методом верхней оценки / Спусканюк В. З., Гангало А. Н., Давиденко А. А., Коваленко И. М. // *Обработка материалов давлением : темат. сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 50–56.
3. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминийсодержащих отходов / А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин и др. – Донецк : Ноулидж, 2010. – 270 с.
4. Белошенко В. А. Теория и практика гидроэкструзии / В. А. Белошенко, В. Н. Варюхин, В. З. Спусканюк; НАН Украины, ДонФТИ им А. А. Галкина. – К : Наукова думка, 2007. – 246 с. – Библиогр.: С. 226–244.
5. Белошенко В. А. Твердофазная экструзия полимеров / В. А. Белошенко, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин; НАН Украины, ДонФТИ им А. А. Галкина. – К : Наукова думка, 2008. – 207 с. – Библиогр.: С. 188–205.
6. Ferrasse S. Scale up and application of equal-channel angular extrusion for the electronics and aerospace industries / S. Ferrasse, V. M. Segal, F. Alford et al. // *Materials Science and Engineering: A*, 2008. – Vol. 493. – №. 1-2. – Pp. 130–140.
7. Evolution of damage in AA-5083 processed by equal channel angular extrusion using different die geometries / R. Luri, C. J. Luis Pérez, D. Salcedo, I. Puertas, J. León, I. Pérez and J. P. Fuertes // *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. – Vol. 211. – № 1, 1 January 2011. – Pp. 48–56.
8. Русин Н. М. Влияние маршрутов РКВП на особенности «концевого эффекта» / Н. М. Русин // *Физика металлов и металловедение*. – 2006. – Т. 102, № 2. – С. 242–249.
9. Экспериментально-теоретический анализ основных показателей качества при равноканальном угловом прессовании / А. В. Периг, А. М. Лаптев, А. В. Тышкевич и др. // *Кузнечно-штамповочное производство*, 2010. – № 2 – С. 14–21.
10. Моделирование процесса равноканального углового прессования: двухпараметрический анализ методом жестких блоков и экспериментальная верификация методом кольцевых сеток / А. В. Периг, А. М. Лаптев, А. В. Тышкевич, Е. А. Бондаренко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21) – С. 40–45.
11. Периг А. В. Компьютерное моделирование течения материалов при равноканальном угловом прессовании: анализ движения вязкой среды и экспериментальная верификация методом маркеров / А. В. Периг, А. М. Лаптев, Н. Н. Голоденко, А. Ю. Лошманов, М. Г. Литвинов // *Обработка материалов давлением : темат. сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 57–62.
12. Equal Channel Angular Extrusion of Soft Solids / A. V. Perig, A. M. Laptev, N. N. Golodenko, Yu. A. Erfort, E. A. Bondarenko // *Materials Science and Engineering : A*, 2010. – Vol. 527. – № 16–17, 25 June 2010. – Pp. 3769–3776. – (Impact Factor 1.806).
13. Формирование макроротора при равноканальном угловом прессовании вязкого материала в остроугольном штампе / А. В. Периг, Н. Н. Голоденко, И. И. Бойко и др. // *Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч. ст.* : в 3 т. Т. 1. – Новокузнецк, 2010. – С. 140–149.
14. Белокуров О. А. Применение программы моделирования процессов ОМД QFort для обучения и исследовательской работы в университетах / Белокуров О. А., Биба Н. В., Гладков Ю. А. // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : темат. сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2008. – С. 9–14.
15. Середа В. Г. Моделирование технологических процессов статистическими методами : монография / В. Г. Середа, В. А. Паламарчук, Я. Е. Пыц. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 84 с.
16. Crawley M. J. *The R Book* / M. J. Crawley. – Chichester : John Wiley & Sons, 2007. – 950 с.
17. Степнов М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1972. – 232 с.
18. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для втузов / Е. Н. Львовский – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.

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

Паламарчук В. А. – канд. техн. наук, доц. кафедры ВМ ДГМА;

Ткаченко Я. Ю. – аспирант ДГМА;

Михеенко Д. Ю. – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ТМ ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: olexander.perig@gmail.com