

Экспериментально-теоретический анализ геометрических особенностей равноканального пластического течения при угловом прессовании материалов по маршруту С

Периг А.В.[†], Бондаренко С.И., Бондаренко Е.А.

[†]olexander.perig@gmail.com

Донбасская государственная машиностроительная академия, ул. Шкадинова, 72, 84313, Краматорск, Донецкая область, Украина

An experimental and theoretical analysis of geometric features of equal channel plastic flow during angular extrusion of materials via route C

A.V. Perig, S.I. Bondarenko, E.A. Bondarenko

Donbass State Engineering Academy, Shkadinova St. 72, 84313 Kramatorsk, Ukraine

Геометрические особенности многопроходного равноканального углового прессования заготовок по маршруту С были проанализированы посредством нанесения исходных квадратных делительных сеток на гладкую поверхность одного из полуцилиндров, образующих начальную заготовку. Установлено снижение неравномерности деформированного состояния материала после четного количества проходов и повышение неравномерности после нечетного количества проходов. Сформулирована гипотеза о наличии суперпозиции логарифмических деформаций для симметрично расположенных слоев заготовки.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, маршрут С, исходная квадратная делительная сетка, макроскопическая ротация, свинец.

The geometric features of multipass deformation of lead workpiece models during Equal Channel Angular Extrusion (ECAE) via route C have been analyzed by the application of initial square separation gridlines to the smooth surface of one semicylinder, which forms the initial cylindrical composite workpiece. A decrease of strain state unevenness after even number of ECAE passes and an increase of strain state unevenness after odd number of ECAE passes have been observed. A hypothesis about superposition of logarithmic strains for symmetrical workpiece layers during multipass route C ECAE has been formulated.

Keywords: Equal channel angular extrusion, route C, initial square separation gridlines, macroscopic rotation, lead.

1. Введение

К настоящему времени процессы интенсивного пластического деформирования (ИПД) [1-3] металлических, полимерных, порошковых и композитных материалов реализуются посредством кручения под высоким давлением [1], сверхпластической формовки [2,9-10], равноканального углового прессования (РКУП) [1,3-5,13-20], всесторонней изотермической ковки [6], электроимпульсной обработки [7], интенсивного растяжения [8, 11], а также линейной сварке трением [12]. Данные процессы ИПД обрабатываемых заготовок получили широкое применение во многих областях физики, нанотехнологии, обработки материалов давлением, механики

деформируемого твердого тела и расчетного материаловедения [1-20].

В то же время дальнейшая коммерциализация процессов ИПД требует решения целого ряда технологических задач, связанных со значительной неравномерностью и неоднородностью распределения деформаций по сечению и по длине обрабатываемого материала при РКУП, что приводит к снижению качества получаемых заготовок [1,3-5,13-20]. Эффекты неравномерности деформирования оказывают особенно существенное кумулятивное влияние на геометрию распределения деформаций при реализации многопроходного РКУП, что и определяет актуальность настоящего исследования,

посвященного экспериментально-теоретическому анализу геометрических особенностей деформированного состояния заготовок при реализации многопроходного РКУП деформируемых заготовок по маршруту С.

При этом необходимо отметить значительные сложности, связанные с геометрическим описанием многопроходного РКУП в рамках метода конечных деформаций ввиду того, что в классических работах Ренне И.П. преимущественно рассматриваются схемы малых искажений ячеек делительной сетки, имеющих форму параллелограмма, справедливых для небольших деформаций образцов [21]. Следует обратить внимание, что более корректное феноменологическое описание экспериментально наблюдаемых трансформаций исходных квадратных ячеек делительной сетки при многопроходном РКУП требует применения методов теории больших пластических деформаций материалов [22-23].

Целью настоящей работы является физическое моделирование характера деформирования свинцовых моделей обрабатываемых заготовок после первых четырех проходов РКУП по маршруту С через Iwahashi-штамп с углом пересечения каналов $2\theta = 90^\circ$ и углом внешнего закругления $\varphi = 56^\circ$ (рис. 1).

2. Физическое моделирование

В рамках реализации физического моделирования многопроходного РКУП были проанализированы экспериментально наблюдаемые трансформации исходной квадратной делительной сетки (рис. 1а), нанесенной на гладкую поверхность одного из двух свинцовых исходных полуцилиндров, образующих первоначальную заготовку. При этом непосредственно после первого ($N=1$) прохода РКУП (рис. 1б) имеет место преобразование исходного квадрата делительной сетки (рис. 1а) в параллелограмм I (рис. 1б). После второго прохода ($N=2$) «исходный» параллелограмм I (рис. 1б) переходит в «новый» параллелограмм II (рис. 1в) и т.д. Т.о. для каждого из последующих проходов РКУП по маршруту С текущий параллелограмм деформированной делительной сетки преобразуется в последующий параллелограмм (для $N = 3$ рис. 1в – рис. 1г; для $N = 4$ рис. 1г – рис. 1д), что существенно усложняет точный количественный расчет основных параметров деформированного состояния материала при многопроходном деформировании. К тому же возможности применения экспериментальных методов, основанных на использовании делительных сеток, к описанию процессов многопроходного РКУП характеризуются целым рядом существенных недостатков, принципиально усложняющих экспериментальный анализ РКУП для $N > 6$.

Во-первых, оценка меры деформации возможна только в рамках монотонного (или, хотя бы, квазимонотонного) деформирования в процессе РКУП. Во-вторых, определенная часть материала физической модели деформируемой заготовки, а с ней и часть узлов нанесенной делительной сетки неизбежно теряются в виде прослойки облоя, образующейся после каждого прохода РКУП. В-третьих, исходные квадратные делительные сетки (рис. 1а) практически полностью стираются по

мере многопроходного деформирования (рис. 1б-д) и после $N > 6$ проходов РКУП становятся непоказательными и малопригодными для дальнейшего экспериментального исследования (рис. 1).

С целью преодоления указанных экспериментальных сложностей сформулируем общее эмпирическое правило сложения компонентов тензоров логарифмических деформаций при осуществлении многопроходного РКУП по маршруту С, обобщающее результаты проведенных экспериментов, представленных на рис. 1. Некоторые из указанных трудностей экспериментального анализа многопроходного РКУП могут быть преодолены, если воспользоваться логарифмическими деформациями, вернее свойством аддитивности логарифмических деформаций, которое справедливо, по крайней мере, в главных осях. В силу независимости полей течения материала от предварительной деформированности или отсутствия таковой, характер течения обрабатываемой заготовки является одинаковым при идентичных граничных условиях. Соответственно при повороте заготовки на 180° между проходами (маршрут С), схема течения слоев материала меняется симметрично и можно утверждать, что поля деформаций получают приращения, аналогичные приращениям для симметричных слоев материала за предыдущий проход. В предположении, что предварительный проков заготовки в процессе первого прохода $N = 1$ (рис. 1б) не влияет качественно на формоизменения во втором проходе $N = 2$ (рис. 1в), считаем, что симметрично расположенные относительно оси заготовки слои деформируемого материала получили взаимодополнительные деформации, что дает возможность утверждать наличие эффекта суперпозиции логарифмических деформаций для симметрично расположенных слоев заготовки, проходящих одинаковые пути деформирования. Качественно это проявляется в том, что после второго прохода РКУП по маршруту С сетка практически выравнивается и делительная сетка, полученная после второго прохода $N = 2$ (рис. 1в), становится несколько ближе к исходной пря-

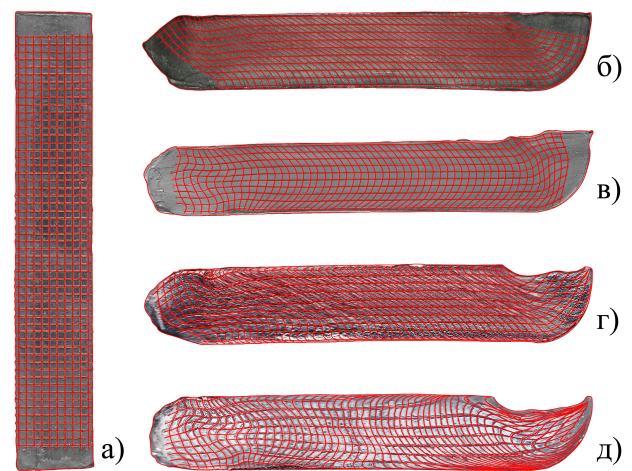


Рис. 1. Экспериментально наблюдаемая схема трансформации исходной квадратной делительной сетки, нанесенной на плоскую поверхность исходного полуцилиндра (а), после первого I (б), второго II (в), третьего III (г) и четвертого IV (д) проходов РКУП по маршруту С при деформировании заготовки через Iwahashi-штамп с углами $2\theta = 90^\circ$ и $\varphi = 56^\circ$.

моугольной $N = 0$ (рис. 1а). Это свидетельствует в пользу дополнительности формоизменений и равномерности полученной проковки после четного числа проходов РКУП по маршруту С.

Действительно, если исходная ячейка делительной сетки в главной плоскости является кольцом с диаметром d_0 (рис. 1а), то после первого прохода РКУП ($N = 1$, рис. 1б) указанное кольцо трансформируется в эллипс с главными полуосями a и b . В то же время исходное кольцо, например с диаметром a (рис. 1а), после второго прохода РКУП по маршруту С ($N = 2$, рис. 1в) превращается в эллипс с полуосями a_1 и b_1 . В таком случае сложение поэтапных деформаций $e_1^{(I)} = \ln(a/d_0)$ и $e_1^{(II)} = \ln(a_1/a)$ приводит к результату $e_1^{(I)} + e_1^{(II)} = \ln(a/d_0) + \ln(a_1/a) = \ln(a_1/d_0) = e$.

Т.о. из аддитивности тензоров логарифмических деформаций и из симметрии многопроходного деформирования в процессах РКУП по маршруту С следует, что получить накопление логарифмических деформаций возможно суммированием компонентов тензора для симметрично расположенных слоев относительно продольной оси заготовки. Т.е. поля главных деформаций должны быть представлены тензорными суммами для симметричных волокон: 1 и 9; 2 и 8; 3 и 7; 4 и 6 в проведенном опыте (рис. 1).

3. Результаты эксперимента

Для описания экспериментально наблюдаемой картины результирующей деформации заготовки введём параметр α , характеризующий суперпозицию последовательных конечных деформаций (рис. 2).

В рамках метода конечных деформаций в качестве меры макроскопической ротации и, следовательно, относительного поворота ячейки деформированной делительной сетки при многопроходном РКУП был принят угол α направления главных осей течения в деформированном состоянии. Для каждого из проходов введенный угол α определялся как угол наклона большой оси вписанного в деформированный параллелограмм эллипса к направлению течения материала (рис. 1).

На рис. 2 приведены графики изменения угла ротации α в зависимости от безразмерной исходной вертикальной координаты y_0/a для трёх выбранных столбцов №2 (рис. 1а), №5 (рис. 1б) и №9 (рис. 1в) среди узлов начальной квадратной делительной сетки. При этом на рис. 2 точки и полиномиальные аппроксимации для угла α после первого прохода РКУП по маршруту С ($N=1$) обозначены белыми маркерами (ooo) и тонкими линиями (—), а после второго прохода ($N = 2$) – черными маркерами (●●●) и жирными линиями (—), соответственно.

Представленные на рис. 2 экспериментально-теоретические результаты физического моделирования, полученные в результате анализа конечных формоизменений исходной квадратной делительной сетки (рис. 1а) после первых двух проходов РКУП по маршруту С (рис. 1б-в), подтверждают экспериментально-наблюдаемые результаты (рис. 1), касающиеся снижения неравномерности деформированного состояния физической модели материала заготовки после четного количества проходов и повышения неравно-

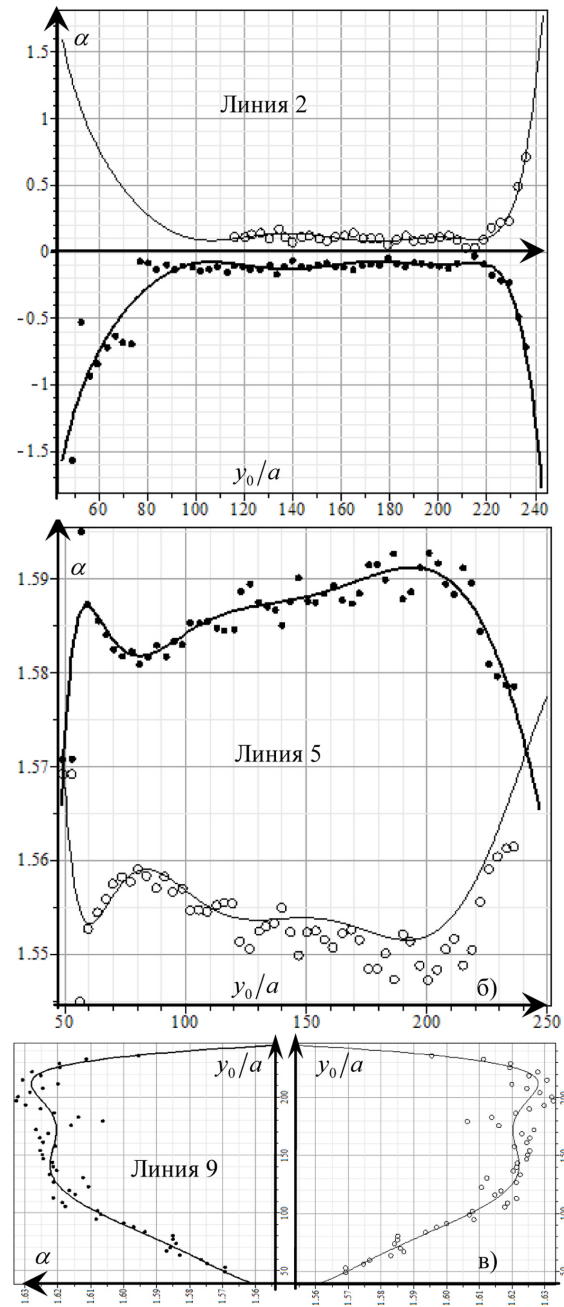


Рис. 2. Экспериментальные зависимости для угла α направления главных осей течения в деформированном состоянии при РКУП свинцовой модели через Iwahashi-штамп с $2\theta = 90^\circ$ и $\varphi = 56^\circ$ по маршруту С для трёх выбранных столбцов №2 (а), №5 (б) и №9 (в) исходной квадратной делительной сетки в зависимости от безразмерной начальной вертикальной координаты y_0/a узлов исходной квадратной делительной сетки. Здесь (—) полиномиальные аппроксимации и (ooo) точки прохода $N=1$, а (—) полиномиальные аппроксимации и (●●●) точки прохода $N=2$.

мерности деформаций после нечетного количества проходов.

4. Заключение

С применением методов физического моделирования, а также экспериментально-теоретических методов исходных квадратных делительных сеток выполнен экспериментальный анализ характера течения свинцовой модели заготовки для первых четырех проходов РКУП

по маршруту С ($1 \leq N \leq 4$). В рамках анализа формоизменения трех последовательных столбцов №2, №5 и №9 исходной квадратной делительной сетки для первых двух проходов РКУП по маршруту С ($1 \leq N \leq 2$) получены численные оценки для угла наклона большой оси вписанного в деформированный параллелограмм эллипса к направлению течения материала. Наличие противофаз для данных графиков качественно подтверждает экспериментально-наблюдаемые результаты физического моделирования и свидетельствует о корректности предложенной гипотезы о сложении компонентов тензоров логарифмических деформаций. Показано снижение неравномерности деформированного состояния физической модели материала заготовки после четного количества проходов и повышение неравномерности деформаций после нечетного количества проходов РКУП по маршруту С.

Литература

1. M.V. Markushev. Letters on Materials **1**, 36 (2011), (in Russian).
2. R.V. Safiullin. Letters on Materials **2**, 32; 36 (2012), (in Russian).
3. A.V. Altukhov, A.F. Tarasov, A.V. Perig. Letters on Materials **2**, 54 (2012), (in Russian).
4. E.G. Astafurova, G.G. Zakharova, E.V. Naydenkin, G.I. Raab, P.D. Odessky, S.V. Dobatkin. Letters on Materials **1**, 198 (2011) (in Russian).
5. A.V. Perig, N.N. Golodenko, I.G. Zhibankov, I.I. Boiko, A.A. Sitnik. Letters on Materials **1**, 217 (2011), (in Russian).
6. M.I. Nagimov, A.A. Nazarov, O. Saray, G. Purcek, O.R. Valiakhmetov, I.M. Safarov, R.R. Mulyukov. Letters on Materials **1**, 151 (2011), (in Russian).
7. E.V. Avtokratova, R.R. Ilyasov, I.Sh. Valeev, O.Sh. Sitdikov, M.V. Markushev. Letters on Materials **1**, 194 (2011), (in Russian).
8. Ye.Ye. Deryugin. Letters on Materials **1**, 231 (2011), (in Russian).
9. E.A. Korznikova. Letters on Materials **1**, 208 (2011), (in Russian).
10. G.F. Korznikova, E.A. Korznikova. Letters on Materials **2**, 25 (2012), (in Russian).
11. A.N. Chuvyrov, A.R. Khamidullin. Letters on Materials **2**, 29 (2012), (in Russian).
12. M.V. Karavaeva, S.K. Kiseleva, V.M. Bychkov, A.Yu. Medvedev, A.V. Supov, F.F. Musin, I.V. Alexandrov, V.V. Latysh. Letters on Materials **2**, 40 (2012), (in Russian).
13. A.V. Perig, A.M. Laptev, A.V. Tyshkevich, E.A. Bondarenko, S.V. Podlesny. Forging and Stamping Production. Materials Working by Pressure **2**, 14 (2010) (in Russian).
14. A.V. Perig, A.M. Laptev, N.N. Golodenko, Yu.A. Erfort, E.A. Bondarenko. Mater. Sci. Eng. A **527**, 3769 (2010).
15. A.V. Perig, A.V. Tyshkevich. Forging and Stamping Production. Materials Working by Pressure **2**, 41 (2012) (in Russian).
16. A.V. Perig, I.I. Boyko, A.A. Sitnik, I.A. Matveyev, S.V. Podlesny, S.I. Bondarenko. Forging and Stamping Production. Materials Working by Pressure **5**, 23 (2012), (in Russian).
17. A.V. Perig, A.M. Laptev, A.V. Tyshkevich, E.A. Bondarenko. Proceedings of the Third International Conference «Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials» (DFMN-2009). Moscow, IMMS RAS (2009) p. 216, (in Russian).
18. A.V. Perig, A.V. Tyshkevich, E.A. Bondarenko, S.I. Bondarenko, D.R. Arakelov. Proceedings of the Fourth International Conference «Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials» (DFMN-2011). Moscow, IMMS RAS (2011) p. 199, (in Russian).
19. S.I. Bondarenko, A.V. Perig, E.A. Bondarenko. Abstracts of All-Russia Youth Conference with the elements of the scientific school «Functional nanomaterials and high-purity substances». Moscow, IMMS RAS (2012), p. 90, (in Russian).
20. A.V. Perig, E.A. Bondarenko, S.I. Bondarenko. Book of articles of the scientific conference with international participation «Geometry of manifolds and its applications». Ulan-Ude, Buryat State University Publishing Department (2012), p. 57, (in Russian).
21. I.P. Renne. Manuf. Eng. **1** (1967), (in Russian).
22. C. Truesdell, W. Noll. The Non-Linear Field Theories of Mechanics. New York, Springer-Verlag (2004) 636 p.
23. A. Bertram. Elasticity and Plasticity of Large Deformations. An Introduction. Springer-Verlag (2008) 340 p.