

# Experimental and numerical investigation of equal channel angular pressing of aluminium alloy AA3003

D.A. Gnevashev<sup>1</sup>, P.A. Petrov<sup>1</sup>, M.A. Petrov<sup>1</sup>, S.A. Stebunov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State Technical University «MAMI» – B.Semenovskaya str., 38, 107023, Moscow, Russia  
URL: [www.mami.ru](http://www.mami.ru) e-mail: [dengnevashev@mail.ru](mailto:dengnevashev@mail.ru); [petrovpa@online.ru](mailto:petrovpa@online.ru); [petrovma@mail.ru](mailto:petrovma@mail.ru)

<sup>2</sup> QuantorForm Ltd. - P.O.Box 39, 119049, Moscow, Russia  
URL: [www.qform3d.com](http://www.qform3d.com) e-mail: [info@qform3d.com](mailto:info@qform3d.com)

**ABSTRACT:** В статье приводятся результаты экспериментального исследования упрочнения алюминиевого сплава AA3003 деформированного при комнатной температуре до значений накопленной деформации более 3. Для достижения большой величины накопленной пластической деформации использовали метод РКУП. На основе экспериментальных данных проведен выбор математической модели сопротивления сплава AA3003 деформации. Исследовано влияние размеров образца и геометрии инструмента на течение металла при РКУП. Проведен металлографический анализ структуры сплава AA3003 после обработки РКУВ до высоких значений деформации.

**Key words:** ECAP, aluminum alloy, effective strain, numerical simulation, finite element method

## 1 INTRODUCTION

Равноканальное угловое прессование (РКУП) является одним из способов создания в металлах и сплавах больших пластических деформаций. Теоретические основы данного метода обработки были разработаны Сегалом [1], а в последующем усовершенствованы Iwahashi [2] и Goforth [3].

В соответствии с работами [1-3] величина накопленной деформации может быть определена следующими уравнениями:

- по Сегалу

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \Phi, \quad (1)$$

- по Iwahashi

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\Phi + \Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi + \Psi}{2} \right) \right], \quad (2)$$

- по Goforth

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\Phi + \Psi}{2} \right) + \Psi \right], \quad (3)$$

где  $\varepsilon_i$  = effective strain,  $\Phi$  = die channel angle,  $\Psi$  = die corner angle (see Fig. 1).

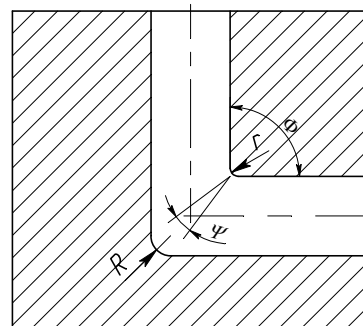


Fig. 1. Typical die geometry for ECAP.

Уравнение (1) соответствует верхней оценке значения накопленной деформации за один цикл РКУП. При этом не учитывается влияние трения и влияние угла  $\Psi$ .

Уравнение (2) и (3) учитывают влияние углов  $\Phi$  и  $\Psi$ , но также как и уравнение (1) не учитывают трения. Как показано в работе [4], расхождение в значениях  $\varepsilon_i$ , полученных по уравнениям (2) и (3) не превышает 5%.

Накопленная деформация за один цикл РКУП может быть также определена либо экспериментально, либо на основе конечно-элементного моделирования. Для

экспериментального определения деформации может быть использован метод координатной сетки. В работе [5] показана возможность применения этого метода для РКУП.

В последнее время конечно-элементное моделирование РКУП проводилось с помощью

таких коммерческих программ, как ABAQUS [6], MARC [7], DEFORM [8], ANSYS [9], MSC AutoForge [10] etc.

В этих работах было исследовано влияние геометрических и технологических на распределение деформации при РКУП. Деформируемый материал рассматривался либо как идеально пластическое, либо как упруго-пластическое тело с учетом деформационного упрочнения или без него.

Известно также [11], что при РКУП в образце после выдавливания можно выделить три области: концевые участки и центральную область, расположенную между ними. В концевых областях деформация распределяется неравномерно и структура материала неоднородна. В центральной области наблюдается обратная картина. Здесь деформация распределяется равномерно и формируется мелкозернистая структура. В работе [11] показано, что протяженность центральной области может оказывать влияние на величину накопленной деформации.

Целью настоящей работы является исследование упрочнения сплава AA3003 при больших пластических деформациях, созданных в материале за счет равноканального углового прессования при комнатной температуре.

В статье приведены результаты определения накопленной деформации за один цикл РКУП, а также рассмотрено влияние геометрии образца и канала в матрице на величину деформации. Величину накопленной деформации за один цикл РКУП определяли экспериментально и на основе конечно-элементного моделирования.

## 2 EXPERIMENTAL PROCEDURE

Для проведения экспериментов использовали образцы, изготовленные из сплава AA3003 (Table 1).

Table 1. Chemical composition

Elem	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti
ent								
%	base	0.1	0.2	1.0- 1.6	0.7	0.6	0.1	0.2

Образцы размером 20×20×60 мм вырезали из горячекатаного прутка диаметром 30 мм.

Исследование микроструктуры исходного материала показало, что структура образцов однородная с размером зерна 10 мкм.

Рабочий канал матрицы для проведения РКУП (см. рис. 1) имел следующие размеры:  $R=29$  мм;  $r=2$  мм;  $\Phi=90^\circ$ ;  $\Psi=90^\circ$ . Каждый образец подвергали 5 этапам РКУП в соответствии с

программой нагружения А (без поворота образца вокруг его продольной оси перед последующим этапом прессования) [12].

Величина накопленной деформации за один этап прессования определялась экспериментально по методу координатной сетки. Для этого несколько образцов разрезали вдоль продольной оси и на плоскость реза наносили сетку (Fig. 2). Размер ячеек сетки 2×2 мм.

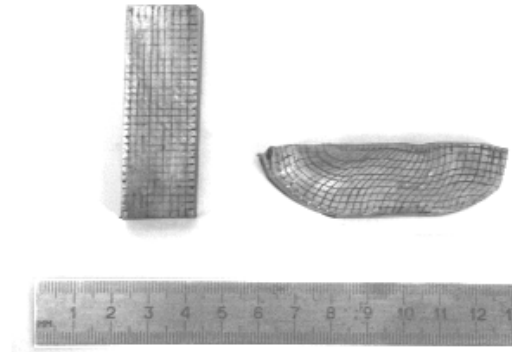


Fig. 2. Sample with reference grid before and after ECAP.

Образцы подвергали РКУП на гидравлическом прессе с номинальным усилием 1МН (100 тс). Скорость перемещения траверсы – 1 мм/с.

После каждого цикла РКУП из деформированного материала параллельно оси прессования вырезали образцы на сжатие следующего размера – диаметр 19 мм и высота 15 мм, а также образцы для проведения микроструктурного анализа.

Испытания на сжатие проводили также на гидравлическом прессе с номинальным усилием 1МН (100 тс) и скоростью перемещения траверсы – 1 мм/с.

В качестве смазывающего материала и при проведении РКУП, и при проведении осадки использовали полиэтилен. Фактор трения этого смазывающего материала – 0.27. Величина фактора трения определена по методу осадки кольцевого образца.

## 3 FINITE ELEMENT ANALYSIS

Моделирование РКУП проводили с помощью конечно-элементной системы QFORM-2D (QuantorForm Ltd., Russia), основанной на теории течения. Для описания поведения деформируемого тела в QFORM используется жестко-вязкопластическая модель. Накопленная деформация определяется уравнением:

$$\varepsilon_i = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i dt, \quad \dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}_{ij} \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (4)$$

where  $\varepsilon_i$  = the effective strain,  $\dot{\varepsilon}_i$  = the effective strain-rate,  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  = the strain-rate tensor components.

Подробное описание системы приводится в работе [13].

Равноканальное угловое прессование может рассматриваться как двумерная задача. Деформация материала происходит за счет простого сдвига.

При численном исследовании влияния размеров образца для РКУП на величину накопленной деформации использовали образцы следующей длины: 40; 50; 60; 70; 80; 120; 150; 200; 230 и 300 мм. Размеры поперечного сечения каждого образца 20×20 мм, что соответствует равновеликой площади диаметром  $D = 22.57$  мм. Соотношение размеров  $L/D$  образцов составило, соответственно: 1.77; 2.21; 2.66; 3.1; 3.54; 5.3; 6.65; 8.86; 10.19; 13.29. Геометрия канала в матрице:  $R=29$  mm;  $\Psi=90^\circ$ ;  $\Phi=90^\circ$ ;  $r=2$  mm.

При численном исследовании влияния геометрии канала в матрице на величину накопленной деформации, величину радиуса  $R$  принимали равной: 29; 10; 5; 3; 1 mm. При этом величина угла  $\Psi$  изменялась адекватным образом:  $90^\circ$ ;  $37^\circ$ ;  $16^\circ 30'$ ;  $9^\circ 30'$ ;  $3^\circ$ . Угол  $\Phi$  и радиус  $r$  не изменяли. В этом случае, моделирование проводили для образцов следующего размера 20×20×60 mm и 20×20×230 mm.

Тепловой эффект деформации не учитывали вследствие низкой скорости деформирования (1 mm/s).

Для оценки эффекта упрочнения исследуемого материала использовали кривую, полученную по результатам испытаний на сжатие и представленную в разделе 4.1.

Моделирование выполняется для одного цикла РКУВ.

## 4 RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1 Hardening effect of alloy AA3003

Для описания экспериментальной кривой упрочнения сплава AA3003, полученной по результатам испытаний на сжатие, использовали зависимость:

$$\sigma_i = A + B e^{-N_1 \varepsilon_i} + C e^{-N_2 \varepsilon_i}, \quad (5)$$

where  $\sigma_i$  = the effective stress (flow stress),  $A$ ,  $B$ ,  $N_1$ ,  $C$ ,  $N_2$  = coefficients:  $A = 131$  MPa,  $B = -61$  MPa,  $N_1 = 3.92$ ,  $C = 4.5$  MPa,  $N_2 = 10$ .

На Fig. 3 представлена кривая упрочнения сплава AA3003 в соответствии с уравнением (5).

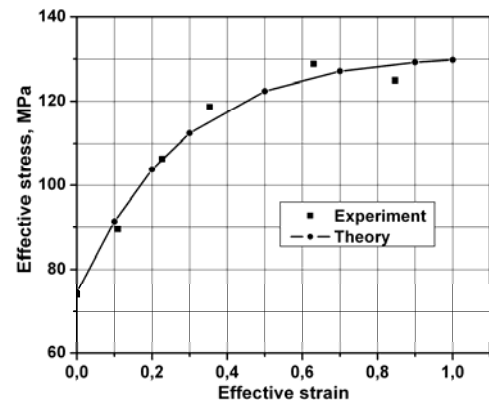


Fig. 3. Hardening curve of alloy AA3003.

### 4.2 Microstructure analysis

Микроструктурный анализ проводился на просвечивающем электронном микроскопе JEM 200 CX.

Были исследованы образцы после 2 и 5 циклов РКУП. Средний размер зерна после двух циклов РКУП составил 4.5 мкм, а после 5 циклов – 3 мкм. Таким образом, основное изменение структуры сплава AA3003 происходит на первых двух циклах РКУП.

### 4.3 Estimation of effective strain value

Величина накопленной деформации, определенная экспериментально по методу координатной сетки для одного цикла ( $N=1$ ) РКУП составляет  $\varepsilon_i=0.82$ . Для 2, 3, 4 и 5 циклов значение деформации, соответственно равно  $\varepsilon_i=1.64$ ; 2.46; 3.28; 4.10.

Сравним полученное значение накопленной деформации за один цикл РКУП со значениями, получаемыми по уравнениям (1)-(3), соответственно:  $\varepsilon_i=1.15$ ;  $\varepsilon_i=0.91$ ;  $\varepsilon_i=0.907$ .

Причина расхождения значений  $\varepsilon_i$  связана с ограничениями уравнений (1)-(3), о которых говорилось в разделе 1. Метод координатной сетки позволяет учесть влияние на  $\varepsilon_i$  как геометрии канала в матрице, так и контактных условий.

### 4.4 Effect of sample size

На рис. 4 приведены графики зависимости средней величины накопленной деформации для центральной области продольного сечения образца от соотношения его размеров  $L/D$ .

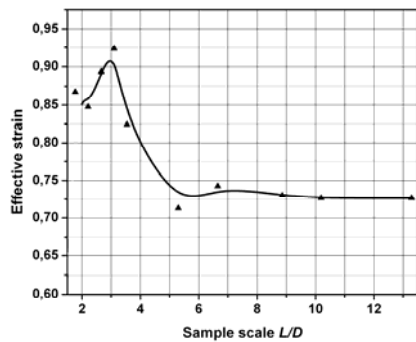


Fig. 4. Effective strain versus sample scale  $L/D$ .

На начальном участке зависимости, представленной на Fig.4, уменьшение накопленной деформации может быть связано, при прочих равных условиях, с влиянием концевых областей образца, в которых деформация распределяется неравномерно. Причем, чем меньше длина образца, тем меньше протяженность центральной области, в которой распределение деформации равномерное.

#### 4.5 Effect of die geometry

На рис. 5 приведены графики зависимости средней величины накопленной деформации для центральной области продольного сечения образца от величины радиуса  $R$ .

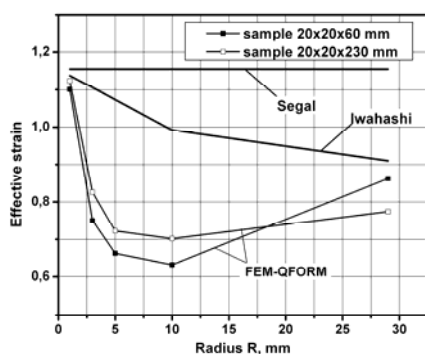


Fig. 5. Effective strain versus radius  $R$ .

Расхождения в значениях накопленной деформации связаны с тем, что формула Iwahashi получена при условии деформирования образца в отсутствие контактного трения. При моделировании РКУП в системе QFORM трение учитывали и считали его постоянным. Уравнение Сегала, как говорилось выше, не учитывает влияние радиуса  $R$ , а следовательно и  $\Psi$ , а также контактного трения на величину  $\varepsilon_i$ .

## 5 CONCLUSIONS

Проведено экспериментальное и численное исследование РКУП алюминиевого сплава AA3003 в условиях холодной деформации. Произведена оценка точности определения

накопленной деформации различными методами. Определены основные причины расхождений между опытными и теоретическими значениями накопленной деформации. Исследовано также упрочнение сплава AA3003 и изменение его структуры после 5 циклов РКУП. Размер зерна после 5 цикла РКУП составил 3 мкм.

Представляется актуальным проведения численного исследования РКУП с учетом теплового эффекта деформации.

## REFERENCES

1. V.M. Segal, V.I. Reznikov, A.E. Drobyshevskiy, V.I. Kopylov, Material Processing by Simple Shear. *Metally*. 1 (1981) 115-123 (in Russian).
2. Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials. *Scripta Mater*. 35, No.2 (1996) 143-146.
3. R.E. Goforth, K.T. Hartwig, L.R. Cornwell, In: *Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation*, eds, T.C. Lowe and R.Z. Valiev, p.3, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands (2000).
4. T. Aida, K. Matsuki, Z. Horita, T.G. Langdon, Estimating the Equivalent Strain in Equal-Channel Angular Pressing. *Scripta Mater*. 44 (2001) 575-579.
5. U.G. Kalpin, U.K. Filippov, D.A. Gnevashev, Method of Hardening Curve Construction Under Severe Plastic Deformation. In: *Proc. Of XXXIX International Scientific and Technical Conference AAE, Moscow* (2002) 13-15.
6. J.Y. Suh, H.S. Kim, J.W. Park, J.Y. Chang, Finite Element Analysis of Material Flow in Equal-Channel Angular Pressing. *Scripta Mater*. 44 (2001) 677-681.
7. Yi-Lang Yang, Shyong Lee, Finite Element Analysis of Strain Conditions After Equal-Channel Angular Extrusion. *J. Mater Process Technol.* 140 (2003) 583-587.
8. H.S. Kim, Finite Element Analysis of Equal-Channel Angular Pressing Using a Round Corner Die. *Mater. Sci. Eng.* A315 (2001) 122-128.
9. V.S. Zhernakov, I.N. Budilov, G.I. Raab, I.V. Alexandrov, R.Z. Valiev, A Numerical Modelling and Investigations of Flow Stress and Grain Refinement During Equal-Channel Angular Pressing. *Scripta Mater*. 44 (2001) 1765-1769.
10. G. Krallics, Z. Szeles, D. Malgyn, Finite Element Simulation of Multi-Pass Equal-Channel Angular Pressing. *Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications*. 414-415 (2003) 439-444.
11. H.S. Kim, S.H. Hong, M.H. Seo, Effects of Strain Hardenability and Strain Rate Sensitivity on the Plastic Flow and Deformation Homogeneity During Equal Channel Angular Pressing. *J. Mater. Res.*, 16, No.3 (2001) 856-864.
12. G. Krallics, J.G. Lenard, Manufacturing of Ultra Fine Grained Materials by Severe Plastic Deformation (a state-of-the-art review), In: *Proc. of International Cold Forming Group Annual Conference*. Helsinki, 2002.
13. N. Biba, A. Lishnij, S. Stebunov, The Development of Net Shape Forging Technology by Means of Numerical Modelling. In: *Proc. of 22 Forging Industry Technical Conference*. Lake Geneva, Wisconsin: FIERF, Sept. 20-22, 1999, USA.