

3D СИМУЛАЦИЯ С ПРОГРАМЕН CAD/CAM ПРОДУКТ НА ДЕФОРМАЦИОННИЯ ПРОЦЕС ПРИ РАВНОКАНАЛНА ЪГЛОВА ЕКСТРУЗИЯ С АКТИВНИ СИЛИ НА ТРИЕНЕ

3D SIMULATION BY CAD/CAE SOFTWARE OF DEFORMATION PROCESS AT EQUAL-CHANNEL ANGULAR EXTRUSION WITH ACTIVE FRICTION FORCES

V.V. Kamburov¹, V.I. Semenov^{2,3}, N.T. Tontchev⁴, V.P. Mishev¹, A.A. Nikolov¹

¹Technical University of Sofia, Bulgaria

²Institute of Strategic Studies, Ufa, Russia

³Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia,

⁴Higher School of Transport „Todor Kableshkov“, Sofia, Bulgaria

Abstract: The application of movable channel walls into the tool design for equal-channel angular pressing (ECAP) is connected with reduction or use of friction forces, which is connected with the change of the irregularity of the stress-strain state within the processed billet. The deformation process of formation of severe plastic deformation zones during the proposed new concept with rotating shaft has been analyzed by CAD/CAE software Quantor Form 8 using 3D simulation. The deformation zone parameters have been optimized and the processing has been designed according to the filling of the deformation tools empty space and billet loss of stability during its severe deformation by the proposed new scheme for equal-channel angular extrusion (ECAE) with active friction forces.

KEYWORDS: SEVERE PLASTIC DEFORMATION, EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION, ACTIVE FRICTION FORCES, CAD/CAE SOFTWARE 3D SIMULATION

1. Въведение

Процесът на интензифициране на пластичната деформация (ИПД) се използва като технология за постигане на структурни промени в обработваните под рекристализационната им температура метали и сплави [1]. Различните процеси и режими на ИПД целят и довеждат до получаването на ултрафина микро/нано структура в деформираното тяло. В следствие на тези структурни промени, металите и сплавите придобиват нови свойства (свърх висока пластичност в съчетание с висока якост и твърдост) [2]. При тези процеси целта е преди всичко изменение на механичните характеристики на металите и металните сплави без изменение размерите на деформираното тяло, което се постига чрез създаване на натисково напрегнато състояние (отрицателен сферичен тензор) при реализиране на деформационна схема на чисто плъзгане. Това предотвратява появата на микропукнатини и позволява достигане на високи степени на деформация, без изчерпване ресурса на пластичност на интензивно деформиран материал.

Най-широко прилаганата технологична схема за интензифициране на пластичните деформации е метода на ъглова равноканална екструзия (РКЕ), базирана на чисто плъзгане (срязване), концентрирано в сравнително тесен деформационен участък, между пресичащите се равнини на каналите [3].

За реализирането на схемата на равноъглова екструзия са нужни сравнително ниски стойности на силата, основно за преодоляване силите на контактно триене по стените на каналите. Основен недостатък за прилагането на деформационната схема при екструдирането е невъзможността да се преодолее контактното деформационно триене, което увеличава повърхностното напрежение в поансона и стените на каналите, като силно променя разпределението на напреженията и деформациите в обема на деформираната заготовка [4]. Решение на този проблем при правото пресоване е намерено чрез използването на конструктивни схеми с активно действие на силите на триене, свързани с наличие на части от матрицата, които са отделно задвижвани [5]. Намаляването на контактното триене при равноканалната екструзия е реализирано по подобен начин, а именно чрез

осигуряването на подвижни части от деформационното пространство на контейнера-матрица. Движещите се части при РКЕ могат да бъдат с постъпателно движение: - на една, две или три от стените на контейнера-матрица, зоната на влизане и излизане (дъно) от каналите [4]; - с използване на движеща се поансон-матрица и неподвижен упор, осигуряващи подвижно деформационно пространство и почти неподвижна (спрямо две от стените на контейнера-матрица деформираща се заготовка [6]. Особено ефективно е, когато движението се реализират с ротационни (въртящи се) части, позволяващи и непрекъсната обработка на дълги полуфабрикати: - използване на контейнер-вал с три ротационно задвижвани стени - ECAP-Conform [7, 8], който увеличава заготовката през зоната на пресечените канали; - използване на въртяща се съставна матрица с променливо напречно сечение [9].

В настоящата разработка са представени резултатите от изследване, проведено с цел установяване на възможността за реализиране на концептуалната идея за едноъглова равноканална екструзия върху въртящ се вал, изпълняващ функциите на подвижно дъно при изхода от деформационното пространство, като ефективна технологична схема за интензифициране на пластичната деформация с използване на активни сили на триене.

За целите са използвани 3D софтуерен продукт за триизмерно моделиране на формообразуващите инструменти и CAD/CAE пакет за компютърна симулация на процесите на обработване на материалите чрез пластична деформация Quantor Form VX 8.4.1. Софтуерът е използван за въвеждане на геометричните характеристики на конструктивната схема на деформиране, характеристиките на определената сплав, температурните условия, скоростта на деформиране и вида на контактното триене (смазващо вещество).

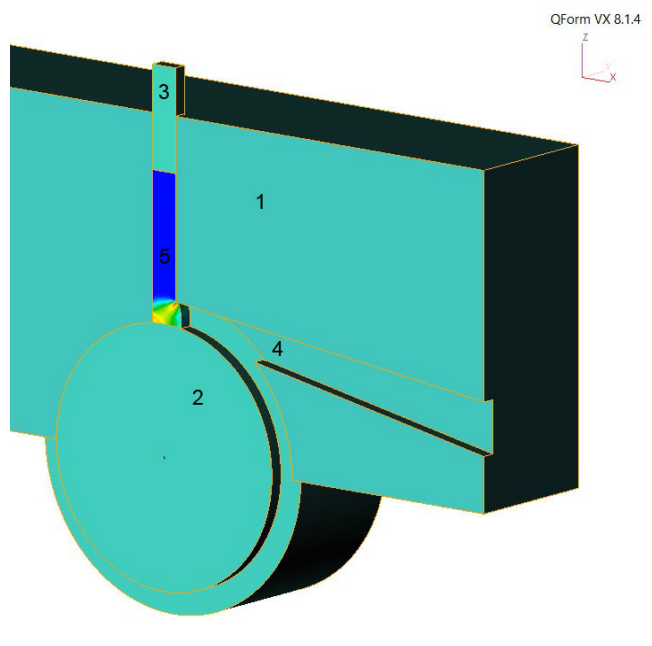
2. Кинематична схема на РКЕ с активни сили на триене

Симулирането на процеса, предмет на настоящата разработка, е базиран на познатия и изучен процес на едноъглова РКЕ с ъгъл на пресичане на двата канала 90°, развит в насока повишаване на неговата ефективност чрез

намаляване влиянието на силите на триене с помощта на въртящи се части в обхвата на деформационната зона.

Симулиран е процеса на едноъглова равноканална екструзия върху въртящ се вал (фиг. 1), при който дъното на деформационното пространство представлява самостоятелно задвижван канал. Силите на контактно триене между заготовката и стените на канала се използват активно - за извеждане на заготовката през деформационното пространство към изходния канал.

При тази конструктивна схема за оформяне на канал върху вал е използвана концепцията на метода ECAP-Conform, т.е. наличие на три подвижни стени, затворени от четвърта неподвижна спрямо деформираната заготовка стена, която преминава в изходен канал (фиг. 1).

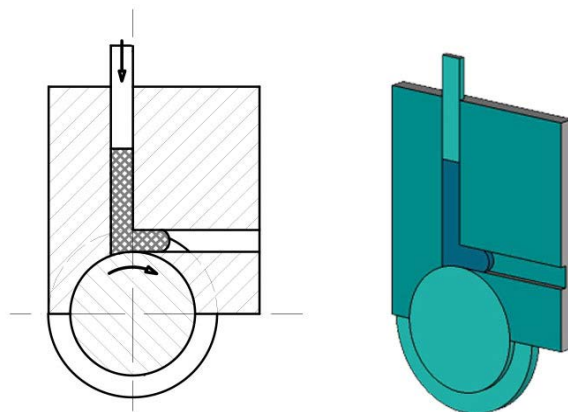


Фиг. 1. Напречен разрез на виртуален инструмент за реализиране на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал (QForm VX 8.4.1).

На фиг. 1 е показана схемата за реализиране на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал с отворен изходен канал. Разликата между известния метод [7, 8] и предложената схема е, че заготовката се деформира под действие на поансон 3, но дъното в зоната на пресечените канали е подвижно (фиг. 1), подобно на схемата на право пресоване с активно действие на силите на триене [5]. Независимото ротационно движение на дъното (вала) 2 не цели увеличаване и екструдиране на заготовката, а се използва за подпомагане процеса на екструдиране и извеждане на заготовката 5 през зоната с интензивна пластична деформация до изходния канал 4, използвайки силите на контактно триене.

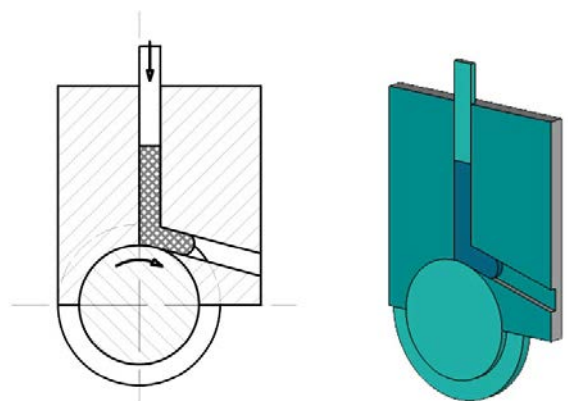
Възможностите за принципното разположение на входящия канал на контейнера са, както следва: - съвпадащ с оста на вала (фиг. 4); - изместен навътре към противоположната на изхода страна (фиг. 2); и - изместен към изходния канал на деформираната заготовка (фиг. 3). И при трите принципни решения, които са дадени на следващите фигури, е необходимо да се спазва условието за запазване напречното сечение на екструдирания заготовка при навлизането ѝ в изходния канал.

При изместване на входящия канал навътре към противоположната на изхода страна (фиг. 2) процесът се трансформира в комбиниран [10], тъй като РКЕ се извършва в условията и е следвана от право пресоване (екструдиране) през стесняващ се отвор. Степента на деформация при правото пресоване от този комбиниран процес се определя от ширината на входящия канал и диаметъра на вала. Вътрешният ъгъл между двата пресечени канала на РКЕ при този вариант с въртящ се вал и затворен калибровач канал е точно 90° .



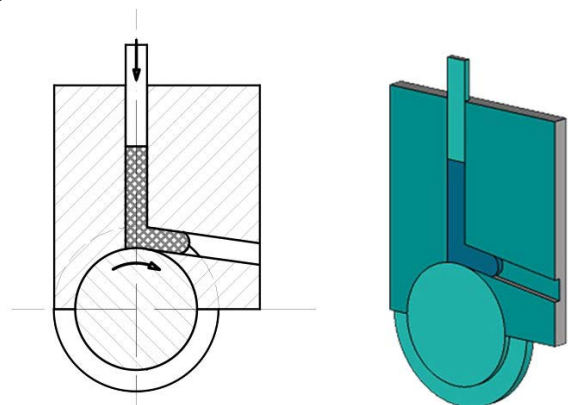
Фиг. 2. Инструмент за реализиране на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал с изместен навътре входящ канал и със затворен калибровач канал

При изместване на входящия канал към изхода на деформираната заготовка (фиг. 3) се наблюдава лесна загуба на устойчивост, дори при сравнително ниски съотношения между скоростта на изтласкване и скоростта на въртене на вала. Това е свързано с незапълване на деформационното пространство във външната страна на кръстосаните канали и преждевременно излизане на заготовката от деформационната зона. Вътрешният ъгъл между двата пресечени канала на РКЕ при този вариант с въртящ се вал и затворен калибровач канал е по-голям от 90° (около 16°).



Фиг. 3. Инструмент за реализиране на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал с входящ канал към изхода и със затворен калибровач канал

Поради тези причини при оптимизиране чрез компютърно симулиране е избрано третото принципно възможно разположение (фиг. 4) – входящ канал с ос, пресичаща оста на въртящия се вал. Вътрешният ъгъл между двата пресечени канала на РКЕ при този вариант е малко по-голям от 90° (около 7°).



Фиг. 4. Инструмент за реализиране на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал с входен канал с ос, пресичаща оста на въртящия се вал и със затворен калибровач канал

3. Симулация на деформационния процес при РКЕ с активни сили на триене

При едноъглова РКЕ с ъгъл на пресичане на двата канала 90° има само една зона на ИПД, като ефективните деформации при чисто плъзгане, се изчисляват по формулата [11]:

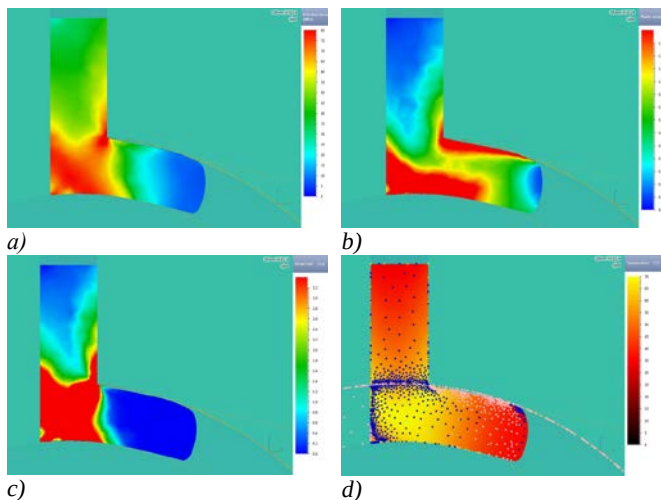
$$\varepsilon_{\text{eff}} = 1/\sqrt{3} [2\cot(\Phi/2 + \Psi/2) + \Psi \operatorname{cosec}(\Phi/2 + \Psi/2)],$$

където: ε_{eff} - ефективни деформации, Φ е вътрешния ъгъл между двата пресечени канала, Ψ е външния ъгъл определящ се от радиуса на закръгление между двата пресечени канала.

От тази зависимост следва, че при най-често използваните ъгли, $\Phi=90^\circ$ и $\Psi=20^\circ$ всяко преминаване акумулира допълнително деформация $\varepsilon_{\text{eff}} \approx 1$. При ъгъл $\Phi=0^\circ$ и $\Psi=0^\circ$, се постига най-голямо акумулиране на интензивност на деформациите за един преход, което е $\varepsilon_{\text{eff}} = 1.15$. Матрици с такъв ъгъл се използват за обработка на чисти метали и лесно деформируеми сплави. За трудно деформируеми сплави, екструзията се реализира при повишени температури и с ъгъл на пресичане на каналите $\Phi > 90^\circ$. Използването на закръгление ($\Psi > 0^\circ$) води до намаляване на силата, която трябва да се приложи върху заготовката за да бъде екструдирена, но това от своя страна намалява ефективните деформации.

Едноъглова РКЕ върху въртящ се вал без калибровачен канал

Триизмерното моделиране на процеса на едноъгловата екструзия върху въртящ се вал, без оформен калибровачен изходен канал, е извършено при стайна температура за заготовка от деформируема алуминиева сплав с размери на напречното сечение $10.6 \times 10.6 \text{ mm}$ и скорост на движение на поансона 50 mm/s и скоростта на въртене на вала (с диаметър 60 mm) от 2 rpm .



Фиг. 5. Симулация на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал без калибровачен канал при 2 rpm (QForm VX 8.4.1): а) разпределение на ефективните напрежения [MPa]; б) разпределение на ефективните деформации; в) разпределение на скоростта на деформация [s^{-1}]; д) температурно разпределение [$^\circ\text{C}$] с контактни точки.

При симулирането (фиг. 5) е установено, че деформираната заготовка изпълва деформационното пространство, а при такова запълване опасността от получаване на дефекти, възникващи в следствие на опънови напрежения, е сведена до минимум. Формирана е двойна кръстообразна зона на интензивна пластична деформация (фиг. 5а, в). От фиг. 5б се вижда, че големината на ефективните деформации при РКЕ върху въртящ се вал без калибровачен канал е сравнително неравномерно разпределена, като варира - $\varepsilon_{\text{eff}} = 1.0 - 1.4$.

Увеличаването на ъгловата скорост на вала до 3 rpm при запазване скоростта на изтласкващия поансон води до разширяване и сливане на двете зони на интензивна пластична деформация и нееднородно разпределение на ефективните деформации в напречното сечение на заготовката.

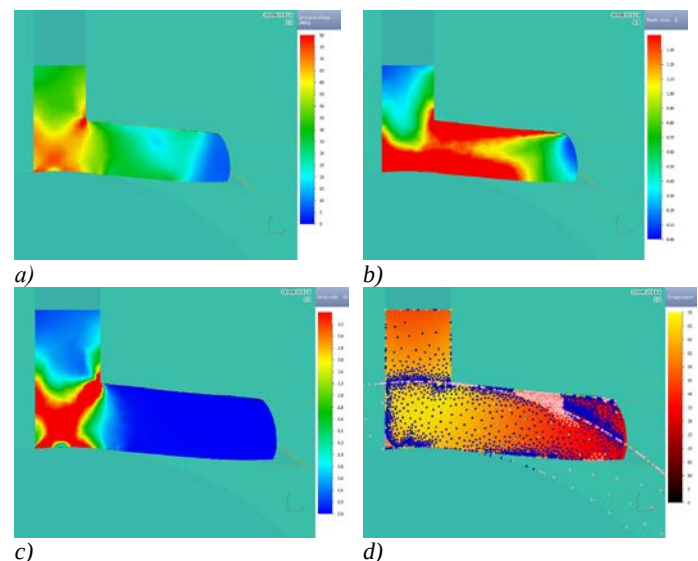
Следващото увеличаване на ъгловата скорост на вала до 5 rpm при запазване скоростта на изтласкващия поансон с цел използване силите на триене за коригиране на формата и изправяне на заготовката води загуба на устойчивост и незапълване на деформационното пространство в опъновата деформационна зона във външната част на оформения изходящ канал.

След излизане от деформационната зона обработената заготовка следва ротационната форма на канала на вала, придобива неправилна (огъната) форма и се отделя от горната вътрешна част на изходящия канал. Неправилната форма не позволява извършването на втори преход без извършване на допълнително калиброване. Това може да се избегне чрез използването на калибровачен канал непосредствено след извеждане на заготовката от зоната с интензивна пластична деформация, който да коригира нейната форма и да принуди заготовката да запълни изцяло деформационното пространство. Калибровачният канал е оформен със зъб (супорт), чийто начало е в канала на въртящия се вал и съвпада с мястото на най-малкото напречно сечение между въртящия се вал и горната част на изходящия канал (фиг. 5 и фиг. 6).

Едноъглова РКЕ върху въртящ се вал с калибровачен канал

Триизмерното моделиране на процеса на едноъгловата екструзия върху въртящ се вал с калибровачен канал е извършено при стайна температура за заготовка от деформируема алуминиева сплав с размери на напречното сечение $10.6 \times 10.6 \text{ mm}$ и скорост на движение на поансона от 50 mm/s и скорост на въртене на вала от 2 rpm .

При зададена ъглова скорост от 2 rpm и скорост на движение на поансона от 25 mm/s се наблюдава цялостно запълване на деформационното пространство, както и зона на съсредоточена деформация на чисто плъзгане (фиг. 6а, в) между кръстосаните канали.



Фиг. 6. Симулация на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал с калибровачен канал (QForm VX 8.4.1): а) разпределение на ефективните напрежения [MPa]; б) разпределение на ефективните деформации; в) разпределение на скоростта на деформация [s^{-1}]; д) температурно разпределение [$^\circ\text{C}$] с контактни точки.

При симулирането на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал (фиг. 6) е установено, че деформираната заготовка изпълва изцяло деформационното пространство. Зоната на интензивна пластична деформация при кръстосаните под ъгъл от 90° канали е оформена ясно, но за разлика от типичната за равноъгловата екструзия единична зона около равнината на пресичане на каналите, се наблюдава двойна кръстообразна зона (фиг. 6а, в). Втората зона, която е под прав ъгъл на равнината на пресичане, вероятно се дължи на действието на силите на триене, които са активни и в случая са причината за

увеличаване на акумулираните деформации. От фиг. 6b се вижда, че големината на ефективните деформации при РКЕ върху въртящ се вал е от порядъка на $\epsilon_{eff}=1.3 - 1.4$, което се отличава от стойностите, достигнати при схемите за РКЕ с единична зона ($\epsilon_{eff}=1.0 - 1.2$). При варианта с калибровач изходен канал тези стойности са по-равномерно разпределени в обема на заготовката и не варират значително по височина към външния радиус на закръгление (фиг. 6b).

4. Резултати и изводи

1. Чрез извършената симулация с програмен CAD/ CAE продукт QForm VX 8.4.1 е установено, че той е подходящ за триизмерно моделиране и анализ на нови схеми за РКЕ с въртяща се част, в условията на активно триене.

2. Проведената компютърна симулация потвърждава възможността за реализация на кинематичната схема на едноъглова РКЕ върху въртящ се вал с калибровач изходен канал и доказва нейната ефективност по отношение на акумулираните ефективни напрежения.

3. Установено е, че за разлика от типичната за равноъгловата екструзия единична зона, при РКЕ върху въртящ се вал се наблюдава двойна кръстообразна зона на интензивна пластична деформация. Двете деформационни зони на чисто плъзгане, намиращи се в обхвата на въртящия се вал, са почти перпендикулярни една на друга и са съсредоточени в зоната на пресичане на входящия канал и изходящия калибровач канал.

4. Определените стойности на акумулираните ефективни деформации при РКЕ върху въртящ се вал с калибровач канал са по-високи ($\epsilon_{eff}=1.3 - 1.4$) и по-равномерно разпределени в сравнение със стойностите, достигнати при типичната едноъглова РКЕ ($\epsilon_{eff}=1.0 - 1.2$).

Благодарности:

Изследванията са финансирани от Договор № ДУНК-01/03 от 12.2009 за проект за създаване на „УНИК за иновации и трансфер на знания в областта на микро/нано технологии и материали, енергийната ефективност и виртуалното инженерство” при Технически Университет – София.

Авторите благодарят на инж. Николета Радева, инж. Красимир Колев и инж. Атанас Йорданов, оказали съдействие при извършване на компютърната симулация със специализирания програмен продукт **Quantor Form VX 8.4.1**.

5. Литература

1. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Bulk nanostructured metallic materials: preparation, structure and properties. – М.: IKC "Akademkniga", 2007. – 398 p. (in Russian).
2. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z., Superplasticity, refinement of the structure and processing of hard-deformable alloys. – М.: Nauka, 2002. – 438 p. (in Russian).
3. Valiev R.Z., Langdon T.G., Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, Progress in materials science 51, 2006, p. 881-981.
4. Segal V.M., Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE), Materials Science and Engineering A 386 (2004) 269–276.
5. Бережной В.Л., Щерба В.Н., Батурин А.И., Пресование с активным действием сил трения, Москва „Металлургия“, 1988.
6. Nikolov A.A., Construction schemes for severe plastic deformation of metals using equal channel angular extrusion, PhD Thesis, Technical University of Sofia, 2016, Sofia, Bulgaria (in Bulgarian).
7. Raab G.I., Valiev R.Z., Equal-channel angular pressing for long-length billets, Tsvetnaya Metallurgiya (Nonferrous Metallurgy). 2000. No5, 50-53 (in Russian).
8. Russian Federation patent No. 93001341, Method of rolling of steel. A.V. Korznikov, I.M. Safarov, R.Z. Valiev, I.Yu. Pyshmintsev, A.A. Emelyanov, Publication date 11.01.1993.
9. Invention patent of the Russian Federation № 2347633, Method for production of ultrafine-grained semi-finished products by drawing with shear, Publication date 27.02.2009, Authors: G.I. Raab, A.G. Raab, Patent owner: Ufa state Aviation Technical University, patent in force.
10. Генов Й.Г., Камбуров В.В., Моделиране и симулация на комбинирани схеми на формоизменение с интензифицирана пластична деформация, Сборник доклади том II от XXVI межд. конференция - 65 години МТФ „100 години от рождението на акад. А. Балевски”, Созопол, България, 2010, 13-19.
11. Segal, V.M. (1999). Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation. Materials Science and Engineering: A 271 (1-2): 322–333.