

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ РІВНОКАНАЛЬНОГО КУТОВОГО ПРЕСУВАННЯ ЗАГОТОВОК РІЗНИХ ПЕРЕРІЗІВ

Makovej V., Melnik V.  
The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([mmi@kpi.ua](mailto:mmi@kpi.ua))

### EXPERIMENTALLY - SETTLEMENT ANALYSIS OF EQUAL CHANEL ANGULAR PRESSING BILLET DIFERENT CROSS - SECTION

*Проведено експериментальне дослідження по пресуванню алюмінію за допомогою рівноканального кутового пресування, виконано математичне моделювання даного процесу методом скінченних елементів. Перевірено можливості використання математичного моделювання при аналізі рівноканального кутового пресування. Визначено деформований стан, який отриманий після пресування в заготовках з різним поперечним перерізом. Досліджено вплив перерізів та радіусів заокруглень на деформований стан. Встановлені інтенсивності деформацій, які виникають в зразках після пресування. Визначено залежність інтенсивності деформації від перерізу зразків та радіусів заокруглень матриці.*

*Ключові слова: Рівноканальне кутове пресування, деформований стан, дрібнозерниста структура, інтенсивність деформації, зусилля пресування, метод скінченних елементів.*

#### **Вступ**

Актуальною задачею сучасного матеріалознавства є розроблення нових матеріалів, які повинні мати підвищені механічні властивості. Наряду з великою кількістю різних методів підвищення властивостей, важливе місце посідають методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Найбільш поширені методи ІПД: рівноканальне кутове пресування (РККП), гвинтова екструзія, інтенсивна пластична деформація крученням. Одним з найбільш досліджуваних та простих в реалізації можна назвати РККП. За допомогою даного методу досягається не тільки підвищення механічних властивостей матеріалу, а і значне подрібнення зерен, яке спостерігається по усьому перерізу зразка. Подрібнення зерна відбувається за рахунок чистого зсуву в районі перегітання металу з вертикального в горизонтальний канал. За чотири – вісім проходів РККП утворюється ультрадрібнозерниста структура без протитиску. За допомогою даного методу ІПД можна отримувати дрібнозернисту структуру в різних матеріалах, навіть в важко деформованих [1-5]. До недоліків процесу РККП відносяться неоднорідність деформування об'єму заготовок [6-8], що є маловивченим та потребує подальшого дослідження.

#### **Мета роботи**

Метою даної роботи є моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) рівноканального кутового пресування заготовок різної форми поперечного перерізу, визначення деформованого стану для перерізів вказаних в залежності від радіусів заокруглень кутів матриці.

#### **Результати досліджень**

При моделюванні визначались такі параметри: зусилля пресування, яке потрібне для вибору обладнання, розподіл інтенсивності деформацій. Враховувались наступні параметри: технологічні (форма заготовок, тертя на контактуючих поверхнях) та фізико-механічні (пружні властивості, діаграма істинних напружень). Метал, який деформували, вважався жорстко - пластичним. Деформуючий інструмент приймали абсолютно жорстким.

Перед моделюванням було проведено експериментальне дослідження. При цьому використовували штампове оснащення для РККП круглих заготовок діаметром 23 міліметри (мм) та довжиною 50 мм з алюмінієвого сплаву Д-16, схема якого зображена на рис. 1. Пресування проводили на гідропресі П-125 з номінальним зусиллям 1250 кН (ціна поділки 2,5 кН), тарування динамометра відбувалося в заводських умовах Армавірського заводу дослідних машин. Перед РККП порожнину матриці змащували графітом та нагрівали до температури 300°C. Зразки нагрівали до температури 400°C з витримкою в печі 20 – 30 хвилин. На рис. 2 показано фотографію заготовки після РККП. Особливістю пресування заготовки в штампі було те, що для виймання її з каналу матриці виконували пресування наступної заготовки, яка і видавлювала першу заготовку з каналу матриці.

Для встановлення можливості розрахункового аналізу процесів РККП в програмі DEFORM 3D, яка була надана у тимчасове використання компанією “ТЕСИС”, проведено моделювання процесу пресування

заготовок різної форми поперечного перерізу з визначенням деформованого стану для різних перерізів в залежності від радіусів заокруглень кутів перетину каналів матриці.

Для моделювання процесу РККП використовували заготовки із алюмінію А00 круглого перерізу діаметром 10 мм та квадратного перерізу зі стороною квадрату 10 мм довжиною 50 мм. На процес РККП впливає велика кількість факторів. Зокрема: маршрут пресування, температура, коефіцієнт тертя, швидкість деформування, радіуси заокруглень, поперечний переріз. В роботі розглянуто деякі з них: радіуси заокруглень в місці перетину каналів, швидкість деформування, коефіцієнт тертя. Основну увагу приділено впливу радіусів заокруглень та поперечного перерізу зразків на нерівномірність деформованого стану. Це пов'язано з великою кількістю досліджень, які були присвячені іншим параметрам і їх вплив на процес в значній мірі вже відомий. Так в роботі [6] досліджено вплив коефіцієнту тертя, маршруту пресування, температури, але не враховано вплив радіусів заокруглень на параметри процесу. Вказане не дає можливість в повній мірі оцінити енерго - силові параметри формування.

З аналізу робіт по РККП можна сказати, що в основному в оснащенні нижній радіус заокруглення менший за верхній. Дану проблему було розглянуто в роботі [5], але не досліджено поведінку матеріалу при пресуванні заготовок різного поперечного перерізу.

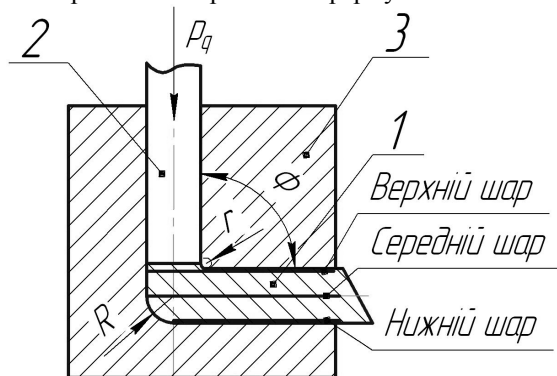


Рис. 1. Схема РККП (1 – заготовка, 2 – пуансон, 3 – матриця)

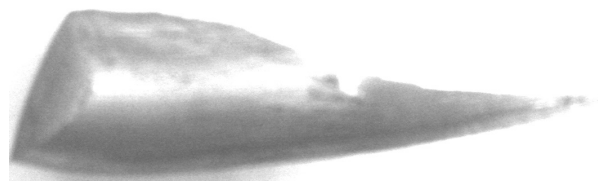


Рис. 2. Фотографія заготовки після РККП



Рис. 3. Здеформована заготовка, яка отримана моделюванням

При моделюванні використовували наступні параметри: кут перетинання каналів  $\Phi = 90^\circ$ ; різні радіуси заокруглень  $R = 0$  мм,  $r = 0$  мм;  $R = 3$  мм,  $r = 1$  мм;  $R = 5$  мм,  $r = 1$  мм (див. рис. 1.); коефіцієнт тертя 0,12; швидкість деформування 2,5 мм/с.

На рис. 3 зображена zdeформована заготовка після моделювання. Порівняння результатів експериментів та моделювання (див. рис. 2) свідчить, що геометрична форма отриманих заготовок подібна, що показує можливість використання моделювання методом скінченних елементів для дослідження РККП.

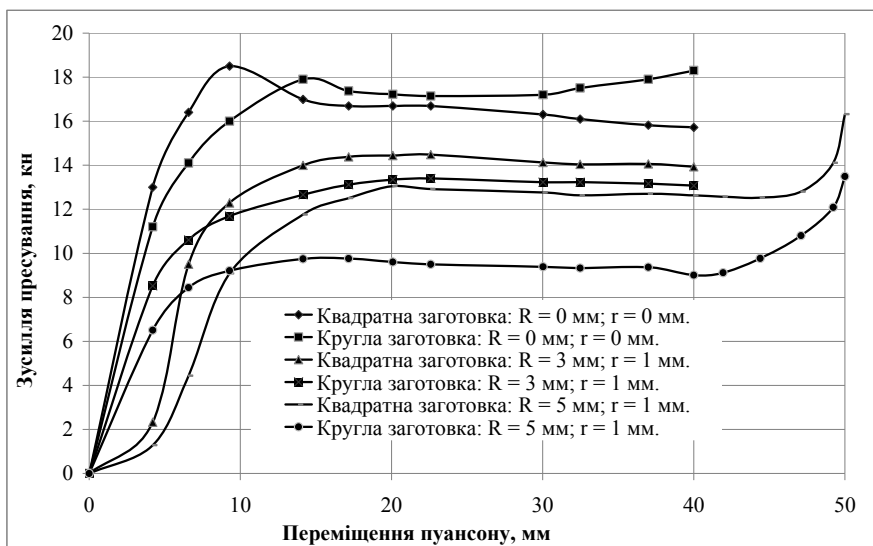


Рис. 4. Залежність зусилля пресування від переміщення пуансону

На рис. 4 показано залежність зусилля пресування від переміщення пуансону. З отриманих графіків видно, що зусилля пресування досягає свого максимуму на неусталеній стадії процесу. Тиск матеріалу на пуансон збільшується в початковий момент пластичного деформування зразка, це пов'язано з тим, що спочатку буде виконуватись осадження зразка з повним заповненням вертикального каналу матриці. В подальшому спостерігається зменшення зусилля пресування за рахунок зменшення висоти заготовки і сил тертя. На величину зусилля впливає не тільки радіуси заокруглень, а і

поперечний переріз зразка. Порівнюючи результати, які отримані для круглого та квадратного перерізів з радіусами заокруглень  $R = 0$  мм,  $r = 0$  мм ( див. рис. 4) видно, що хоча максимальне зусилля і більше при використанні квадратного перерізу, але в подальшому воно в більшій мірі зменшується ніж при використанні круглої заготовки. Зі збільшенням радіусів заокруглень зусилля пресування зменшується для обох випадків. При РККП з  $R = 5$  мм,

$r = 1$  мм було пропресовано заготовку на більшу величину, щоб визначити, як буде себе вести матеріал при подальшому пресуванні. При цьому спостерігається значне збільшення зусилля, що пов'язано зі зменшенням висоти осередку деформації матеріалу під пуансоном.

За допомогою моделювання було встановлено деформований стан по всьому об'єму заготовок. З отриманих даних можливо оцінити неоднорідність деформації в перерізі заготовки.

На рис. 5 представлено розподіл інтенсивності деформацій по перерізу для круглого та квадратного зразків з використанням радіусів заокруглень  $R = 5$  мм,  $r = 1$  мм.

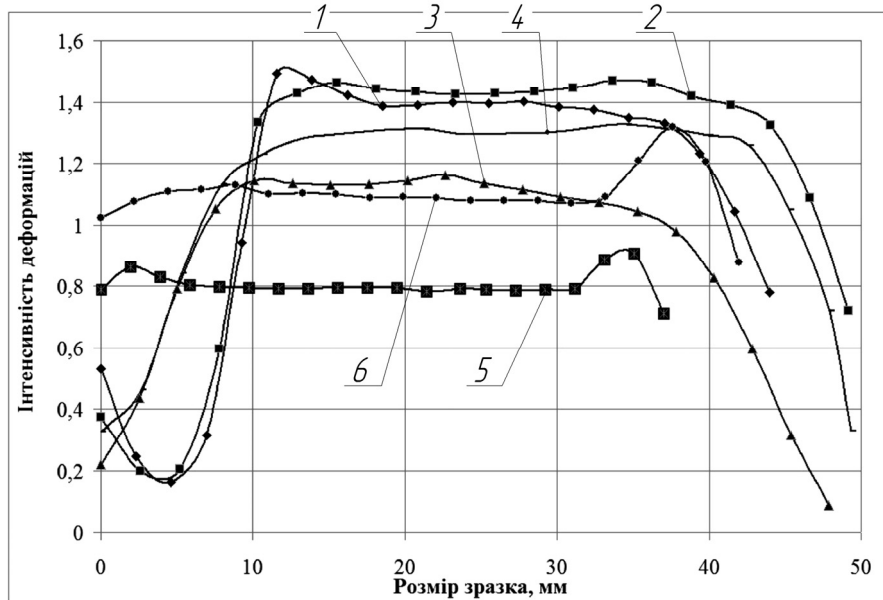


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформації в зразку з радіусами заокруглень  $R=5$ мм,  $r = 1$  мм: 1 – верхній шар квадратної заготовки, 2 – верхній шар круглої заготовки, 3 – шар по вісі квадратної заготовки, 4 – шар по вісі круглої заготовки, 5 – нижній шар квадратної заготовки, 6 – нижній шар круглої заготовки

Аналізуючи розподіл інтенсивності деформації в zdeформованій заготовці, видно, що при пресуванні, як круглих так і квадратних зразків існує значна неоднорідність деформації по перерізу заготовки. Інтенсивність деформації визначалась для трьох шарів заготовки: верхнього шару який на 1 мм віддалений від верхнього краю заготовки, середнього шару який проходить по вісі заготовки та нижнього шару який віддалений від нижнього краю заготовки на 1 мм (див. рис.1.). Отримана неоднорідність пов'язана головним чином з особливостями течії металу через осередок деформації, який виникає між нижнім та верхнім кутами вертикального та горизонтального каналу.

При детальному розгляді даного розподілу, зразок можна поділити на три зони, в яких створюється різна величина інтенсивності деформації. Дві крайні зони, в яких спостерігається значна неоднорідність деформації, та внутрішня зона де інтенсивність деформації більш однорідна.

Інтенсивність деформації різна не тільки по горизонтальному перерізу заготовки, а і по вертикальному. В верхньому шарі інтенсивність деформації більша ніж в нижнього шару горизонтального каналу. В середньому шарі спостерігаємо значну однорідність деформації майже по всьому перерізу заготовки. Порівнюючи результати, які отримані для круглого та квадратного зразків, можна зробити висновок, що різний поперечний переріз мало впливає на величину інтенсивності деформації в верхньому та середньому шарах, але в більшій мірі на інтенсивність деформації в нижньому шарі.

З порівняння графіків, які зображено на рис. 5, видно, що на однорідність інтенсивності деформації в більшій мірі впливає радіус заокруглення деформуючого інструменту, а не переріз зразка.

Для отримання більш детальної інформації розглянемо розподіл інтенсивності деформації в ключових зонах заготовки після деформування. Даними зонами можна вважати осередок деформації, область під пуансоном, кінцева частина заготовки. Вказаний розподіл було зроблено з тих міркувань, що в цих зонах спостерігається значна неоднорідність деформації. Осередок деформації буде розглядатись для отримання повної інформації щодо особливостей перетікання матеріалу з вертикального в горизонтальний канал. На рис. 6 відмічено відрізками зони, які розглядаються. Відрізком  $a - b$  відмічена зона під пуансоном де будемо визначати інтенсивність деформації, відрізком  $c - b$  відмічено зону осередку деформування, а відрізком  $d - e$  кінцеву зону.

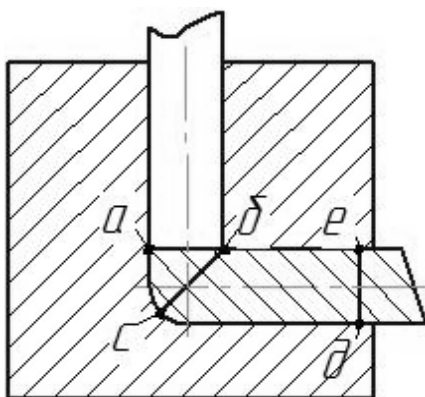


Рис. 6. Характерні зони, для яких визначено інтенсивність деформації

Для початку розглянемо розподіл інтенсивності деформації під пуансоном. Графік розподілу зображено на рис. 7. З отриманих кривих видно, що деформація неоднорідна. Спостерігається незначне спадання інтенсивності деформації від зовнішнього краю пуансона до вісі з подальшим збільшенням при наближенні до верхнього кута перетину каналів, що свідчить про складний характер течії матеріалу.

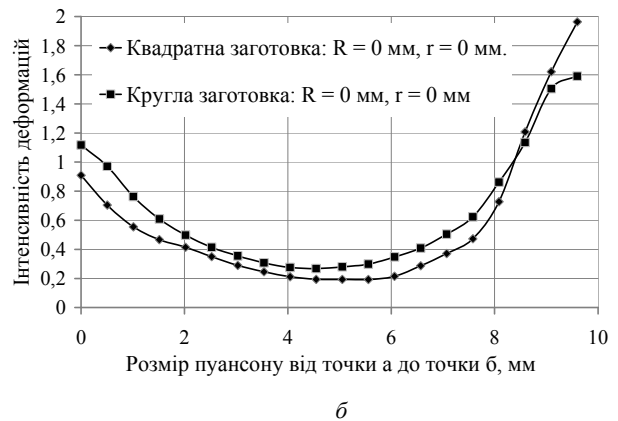
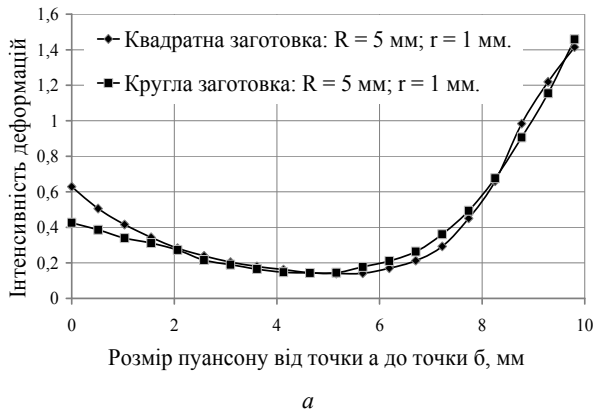


Рис. 7. Розподіл інтенсивності деформацій під пуансоном між точками *a* та *б*:  
*a* -  $R = 5$  мм,  $r = 1$  мм; *б* -  $R = 0$  мм,  $r = 0$  мм

Розподіл інтенсивності деформацій в осередку деформації представлено на рис. 8. На ньому видно, що при використанні збільшених радіусів заокруглень спостерігається збільшення інтенсивності деформації від нижнього кута до верхнього, це пов'язано з тим, що шари матеріалу течуть по різному біля верхнього та нижнього кутів перегину каналів. В разі круглого перерізу та нульових радіусів виявлено значне збільшення інтенсивності деформації у нижнього кута.

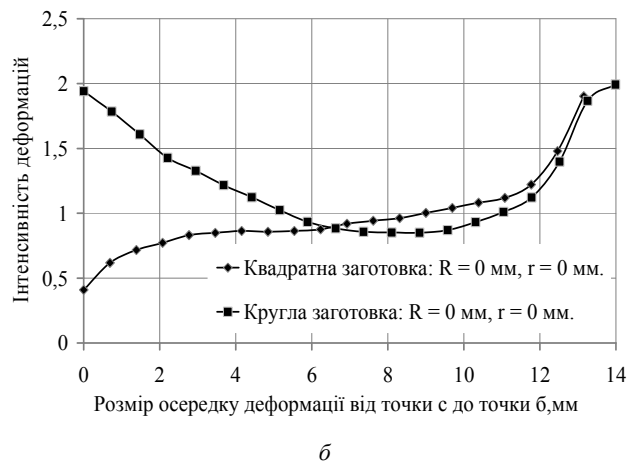
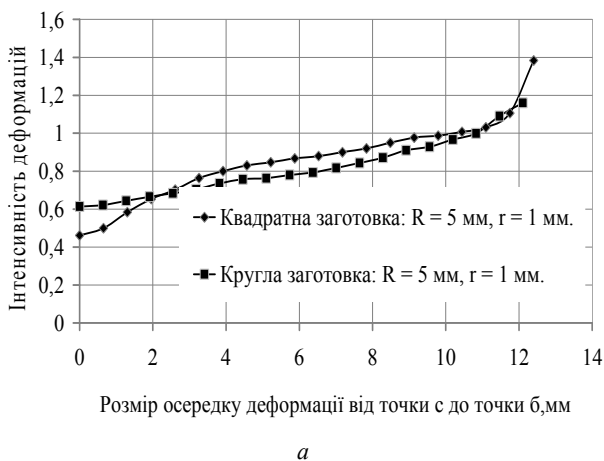


Рис. 8. Розподіл інтенсивності деформацій в осередку деформування між точками *c* та *б*:  
*a* -  $R = 5$  мм,  $r = 1$  мм; *б* -  $R = 0$  мм,  $r = 0$  мм

Розподіл, який зображено на рис. 9, відображає інтенсивність деформацій в кінцевій зоні від нижньої частини горизонтального каналу матриці до верхнього. Так як інтенсивність визначалась між частинами каналу, то виходячи з цих кривих, можна зробити висновок, що кінцева частина зразка відліпає від поверхні каналу.

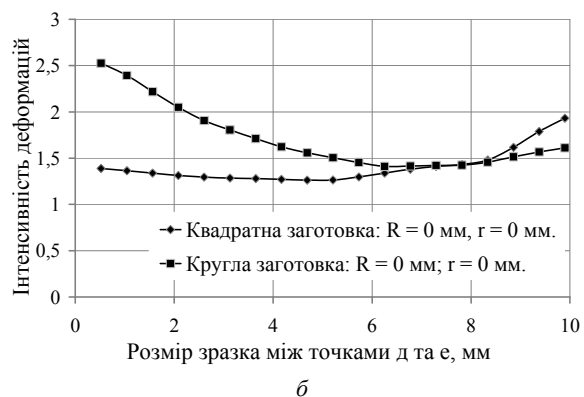
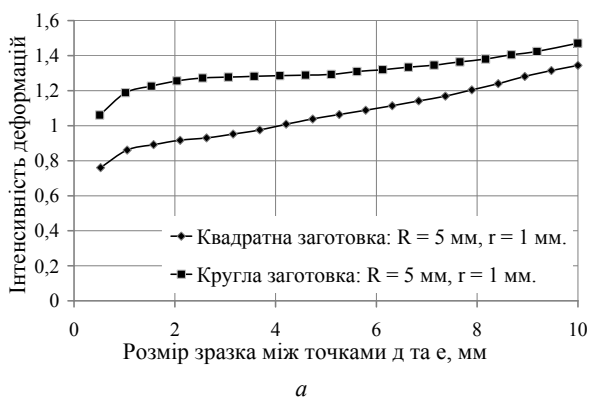


Рис. 9. Розподіл інтенсивності деформацій в кінцевій частині зразка між точками *d* та *e*:  
*a* -  $R = 5$  мм,  $r = 1$  мм; *б* -  $R = 0$  мм,  $r = 0$  мм

**Висновки**

1. Визначено деформований стан в круглих та квадратних заготовках за рахунок моделювання РККП методом скінчених елементів та встановлено збільшення в здеформованій заготовці інтенсивності деформацій в 2 рази в верхніх шарах у порівнянні з нижніми.

2. Проаналізовано вплив форми перерізу зразків та радіусів заокруглень в місці перетину каналів на величину зусилля деформування та неоднорідність деформацій. При цьому встановлено збільшення зусилля пресування приблизно в два рази при зменшенні радіусів заокруглень з  $R = 5$  мм,  $r = 1$  мм до  $R = 0$  мм,  $r = 0$  мм для круглого перерізу та в 1,5 рази для квадратного.

**Анотация.** Проведено экспериментальное исследование по прессованию алюминия при помощи равноканального углового прессования, выполнено математическое моделирование данного процесса методом конечных элементов. Проверено возможности использования математического моделирования при анализе равноканального углового прессования. Исследовано влияние формы образцов и радиусов скруглений на деформированное состояние. Определены интенсивности деформаций, которые возникают в образцах после прессования. Установлено зависимости интенсивности деформаций от формы образца и радиусов скруглений матрицы.

**Ключевые слова:** Равноканальное угловое прессование, деформированное состояние, мелкозернистая структура, интенсивность деформаций, усилие прессования, метод конечных элементов.

**Abstract.** Due to the fact that modern industry demands high performance in materials has been developed method equal channel angular pressing, which forms the subject of this study. For a full analysis of this method was worked out several articles from this direction.

Purpose of this study will analyze the influence of different cross sections and radii of curves of deformation.

Methodology. The analysis was carried out by mathematical modeling equal channel angular pressing using applications. From the data obtained in this manner was constructed curves reflecting the dependence of the intensity of deformation of cross-sectional samples and radii of curves. These curves show that the intensity of deformation in the specimen is very heterogeneous. This heterogeneity of the intensity of deformation has been very carefully analyzed.

Findings. Based on the data was made conclusions about the impact cross sections and radii of curves on the intensity of deformation is determined that the intensity of deformation in the upper more than lower.

**Keywords:** Equal channel angular pressing, strain state, fine-grained structure, intensity of deformations, effort of pressing, a method of final elements.

1. Красильников Н. А. Прочность и пластичность меди после равноканального углового прессования с противодействием /Н.А. Красильников// Металлы – 2005 - №3 – С. 35 – 42
2. Adedokun S.T. A Review on Equal Channel Angular Extrusion as a Deformation and Grain Refinement Process /S.T. Adedokun// Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS) – 2011 – P. 360 - 363
3. Cabibbo M. Transmission Electron Microscopy Study on Subgrain and Grain Formation during Equal-Channel Angular Pressing of an 1200 Aluminium Alloy /M. Cabibbo, E. Evangelista// MATERIALS FORUM VOLUME 28 – 2004 – P. 190 – 196.
4. Podrezov Yu. M. Nanocrystalline structure formation under sever plastic deformation and its influence on mechanical properties /Yu. M. Podrezov // Физика и техника высоких давлений – 2005 – том 15 - №1 – С. 11 – 18.
5. Рааб Г. И. Получение наноструктуры в титане методом равноканального углового прессования / Г. И. Рааб, Р. З. Валиев // Металловедение и термическая обработка металлов – 2000 - №9 – С. 27 – 32
6. Овечкин Л. М. Анализ процесса равноканального углового прессования /Л. М.Овечкин // Обработка материалов давлением – 2010 - №1 – С. 66 – 69
7. Рааб Г.И., Макарычев К. Н., Валиев Р. З. Особенности напряженно – деформированного состояния при равноканальном угловом прессовании с противодействием / Г. И. Рааб, К. Н. Макарычев, Р. З. Валиев// Физика и техника высоких давлений – 2005 – том 15 - №1 – С. 72 – 79.
8. Русин Н.М. Влияние маршрутов РКУП на особенности «концевого эффекта» /Н. М. Русин// Физика металлов и металловедение. – 2006.– том 102 - №2 – С. 2 – 249.

**REFERENCES**

1. Krasil'nikov N. A. Metally (Metals), 2005 , no 3, pp. 35 – 42
2. Adedokun S.T. Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS), 2011 pp. 360 - 363
3. Cabibbo M., Evangelista E. MATERIALS FORUM VOLUME 28 , 2004, pp. 190 – 196.
4. Podrezov Yu. M. Fizika i tehnika vysokih davlenij (Physics and technique of high pressures), 2005 , tom 15, no1, pp. 11 – 18.
5. Raab G. I., Valiev R. Z. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. Physical metallurgy and technical treatment of metals, 2000, no 9, pp. 27 – 32
6. Ovechkin L. M. Obrabotka materialov davleniem (Treatment of materials pressure), 2010 , no 1, p. 66 – 69
7. Raab G.I., Makarychev K. N., Valiev R. Z., Fizika i tehnika vysokih davlenij. (Physics and technique of high pressures), 2005, tom 15, no 1, pp. 72 – 79.
8. Rusin N.M. Fizika metallov i metallovedenie. (Physics of metals and physical metallurgy), 2006. tom 102 , no.2, pp. 2 – 249.