

Ю.Ю. Зубко, Я.В. Фролов, О.М. Кузьміна, А.А. Самсоненко, О.С. Бобух

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОНИ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ БАГАТОКАНАЛЬНІЙ КУТОВІЙ ЕКСТРУЗІЇ

Анотація. В роботі наведено результати досліджень сучасного процесу багатоканальної кутової екструзії. Метою дослідження є визначення особливостей зони деформації та пластичного плину металу в даному процесі. Експериментальну частину дослідження здійснено шляхом аналізу викривлення координатної сітки в зоні деформації після закінчення процесу. Аналіз сітки дозволив виокремити певні елементи зони деформації. Розроблений інструмент, що забезпечує проведення багатоканальної кутової екструзії. Особливістю розробленого інструменту є те, що матриця інтегрована у контейнер і виконується розбірною. Встановлено, що центральні шари металу деформуються легше, а шари, потік яких сповільнюється внаслідок контактного тертя між інструментом та заготовкою, деформуються із затримкою. За допомогою експериментальних даних підтверджено адекватність розробленої в програмі QForm © математичної моделі процесу. Дану математичну модель буде використано для подальших досліджень.

Ключові слова: обробка тиском, багатоканальна кутова екструзія, подрібнення зерна, нерівномірна деформація, зона деформації, координатна сітка, метод скінченних елементів, математична модель.

Постановка проблеми

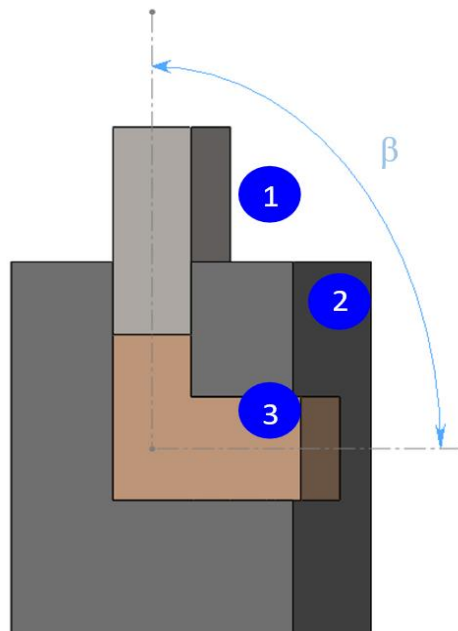
Основною конкурентною перевагою продукції, виготовленої за допомогою процесів обробки металів тиску, є сполучення високих міцнісних властивостей з досить високим рівнем ударної в'язкості. Деформація структури металу, яка після відповідної термічної обробки забезпечує однорідну дрібнозернисту структуру металу, відбувається саме в процесі обробки тиском [1]. Ця деформація структури є необхідною умовою для досягнення необхідного поєднання міцнісних та пластичних властивостей виробу [2]. Аналіз вимог до виробів показує, що із зменшенням питомої товщини виробу для більшості відомих матеріалів зростає відношення між

граничною міцністю на розрив та межею текучості [3, 4]. Це пояснюється тим, що збільшення ступеня деформації призводить до зменшення розміру зерна для більшості технологічних процесів обробки тиском.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Необхідність отримання дрібнозернистої структури виробів з відносно великою товщиною (площею поперечного перерізу) сприяв розвитку методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Такі методи завдяки сприянню пластичному зсуву в зоні деформації призводять до інтенсивної деформації структури. Найпоширенішими методами інтенсивної пластичної деформації є асиметрична прокатка [5] та кутова екструзія [6]. Дане дослідження має за мету розвиток останнього з названих процесів.

Кутова екструзія може бути виконана як із зменшенням площі перерізу в зоні деформації, так і без неї. У цьому випадку річ іде про рівноканальне кутове пресування (РККП). РККП є одним з методів інтенсивної пластичної деформації [7]. На відміну від інших методів ІПД, РККП досить рівномірно подрібнює зерна та змінює їх форму [6]. Цей метод може бути використаний для отримання ультрадисперсної [8] деформованої структури. Інтенсифікація процесів пластичного зсуву зумовлена зміною кута β між вхідним та вихідним каналами матриці (рис. 1).



1 - пуансон; 2 - матриця; 3 –заготовка

Рисунок 1 – Схема рівноканальної кутової екструзії

Останнім часом рівноканальна кутова екструзія перейшла від екзотичного методу обробки металів до звичного та визнаного методу отримання дуже дрібних зерен у широкому діапазоні металів та сплавів. Завдяки цьому на сьогоднішній день РККП є найбільш розвиненим з усіх можливих методів інтенсивної пластичної деформації. Крім того, РККП демонструє потенціал для промислового застосування [9].

Зменшення розміру зерен під час РККП забезпечує прояв ефекту надпластичності металів, що становить великий інтерес для сучасної авіаційної та аерокосмічної промисловості [10]. Важливою особливістю процесу РККП є так звана адитивність подрібнення зерна зі збільшенням ступеня деформації. Ця особливість дозволяє використовувати метали та сплави з низькою пластичністю та значною анізотропією властивостей у процесах інтенсивної пластичної деформації [11, 12].

На рис. 2 показано мікроструктуру стрижня діаметром 100 мм зі сплаву $\text{MgCa}_{0,8}$, отриманого за допомогою одно- та двопрхідного РККП. Світлини були зроблені в поперечному напрямку на відстані 25 мм від осі стрижня [10].

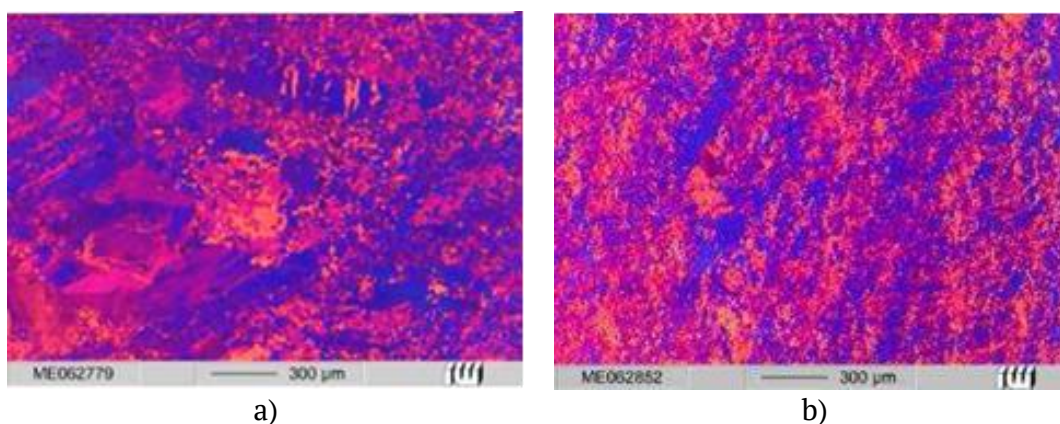


Рисунок 2 – Фотографії структури сплаву $\text{MgCa}_{0,8}$ після першого (a) та другого (b) проходу РККП [10]

Було досліджено вплив РККП на механічні властивості алюмінієвого сплаву в роботі "Structure and mechanical properties of commercial Al–Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing" [11] авторів V.M. Markushev, M.Yu. Murashkin. Мікрокристалічна структура з середнім розміром зерна 0,4 мкм була досягнута в результаті інтенсивної пластичної деформації за допомогою РККП. Було виявлено, що структура значно відрізняється нерівновісним станом внутрішніх зерен, а також асиметричною текстурою

деформації. Обробка зазначеного сплаву за допомогою РККП призвела до збільшення міцності на розрив і пластичності порівняно з більш традиційними методами обробки.

В результаті розвитку РККП з'явився новий напрямок — нерівноканальне кутове пресування (НРККП). Arman Hasani був одним із перших, хто описав цей процес у своїй роботі "Principles of Non-equal Channel Angular Pressing" [12]. Суть процесу полягає у зменшенні діаметра вихідного каналу порівняно з вхідним каналом. Аналіз режиму деформації під час процесу проводили для випадку, коли кут перетину каналів становив 90 градусів. Автори визначили, що в цьому випадку основним механізмом деформації був простий зсув, і тому заготовка отримала таку ж дрібнозернисту структуру, що і в РККП. Однією з основних цілей цієї роботи було передбачити еволюцію кристалографічної структури в процесі екструзії. Головною особливістю режиму деформації при НРККП є те, що площа зсуву наближається до площини процесу, сприяючи появі та розвитку зсувних текстур, які мають більшу пластичність. Інший важливий аспект процесу НРККП пов'язаний з гідростатичним тиском. Застосування протитиску, здійсненого за допомогою опори у вихідному каналі [13], показало хороші результати. Цей тиск реалізується в НРККП за рахунок зменшення діаметру вихідного каналу. Це робить НРККП значніше ефективним методом для отримання об'ємних наноструктурних матеріалів [14].

У роботі La'szlo' S. To'th., Rimma Lapovok, Arman Hasania й Chengfan Gub "Non-equal channel angular pressing of aluminum alloy" [15] показано, що досі НРККП не було досліджено експериментально. У названій роботі автори представили порівняльне експериментальне дослідження процесів РККП та НРККП. Вони використовували алюмінієвий сплав AA2124, оброблений за 1 прохід кожним з методів. Для НРККП матрицю модернізували таким чином, що співвідношення діаметрів вхідного та вихідного каналів було рівним 2. Всі випробування проводили при кімнатній температурі та постійній швидкості екструзії 1 s^{-1} . Дослідження зразків структури (рис. 2) показало, що після одного проходу НРККП (рис. 3, b) зерно дістає більше відносне подовження порівняно з зернами зразка, обробленого РККП (рис. 3, c).

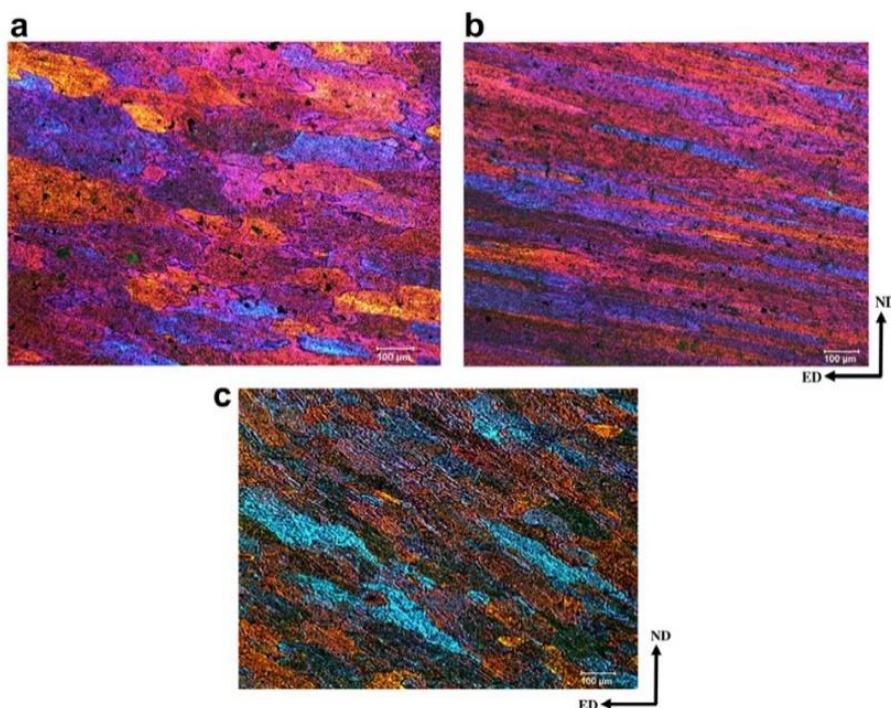


Рисунок 3 – Мікроструктура алюмінієвого сплаву AA2124:
а) оригінальна; б) після НРККП; в) після ПДПВ;
ED - напрямок екструзії, ND - нормальний напрямок[15]

Мета дослідження

Результати, представлені в цій роботі, показують, що НРККП призводить до отримання більш дрібної мікроструктури за один прохід, ніж РККП. Таким чином, можна зробити висновок про те, що НРККП добре підходить для формування і розвитку дрібнозернистої структури металу, а також значно збільшує його міцність, пластичність і ударну в'язкість в результаті деформації зсуву. Однак відомі методи з НРККП мають великий недолік. Ці процеси виготовлення напівпродукту (пруток, смуга) є такими, що вимагають додаткової обробки. Однак термічний або деформаційний вплив при такій додатковій обробці може негативно вплинути на структуру. Отже, завдання використання інтенсивної пластичної деформації (ІПД) як операції кінцевої деформації у виробництві готового виробу є актуальним.

Однак, як буде показано нижче, значна нерівномірність напружень і деформацій в пластичній частині зони деформації (ПЧЗД) при екструзії є типовим для процесів НРККП.

**Експериментальне та теоретичне дослідження течії металу
під час багатоканальної кутової екструзії**

Багатоканальне НРККП (далі БНРККП) може стати новим напрямком у виробництві дрібнозернистих металів і сплавів. Як і в усіх розглянутих методах, суть полягає в протисканні заготовки через матрицю, яка має 2 і більше вихідних каналів, розташованих під кутом 90° до осі екструзії. Ця конфігурація матриці дозволяє забезпечити деформацію зсуву, необхідну для подрібнення зерна, а також достатнє гідростатичне навантаження, необхідне для інтенсифікації процесів двійникування [14]. Перевагою БНРККП в цьому випадку є отримання готового виробу, наприклад, маточини зі спицями (рис. 4). При цьому виріб отримують із відносно дешевої штаби, яка може мати вихідну литу структуру.

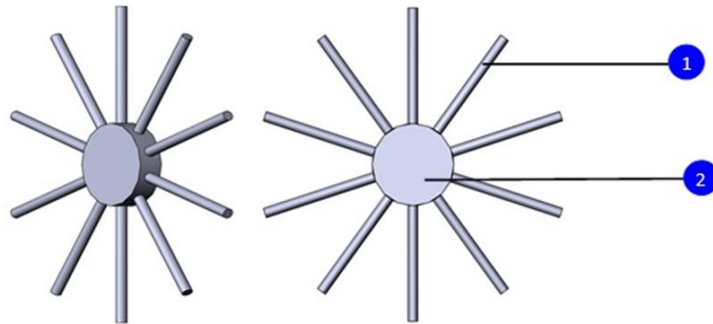
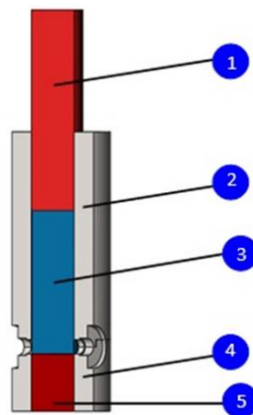


Рисунок 4 – Маточина зі спицями: 1 - спиці; 2 - частина маточини

Інструмент для виготовлення деталей типу маточини методом кутової екструзії був розроблений на кафедрі обробки металів тиском Національної металургійної академії України (рис. 5).



1 - пуансон, 2 - верхня частина контейнера,
3 - заготовка, 4 - нижня частина контейнера, 5 – опора
Рисунок 5 – Інструмент для БНРККП у зборі

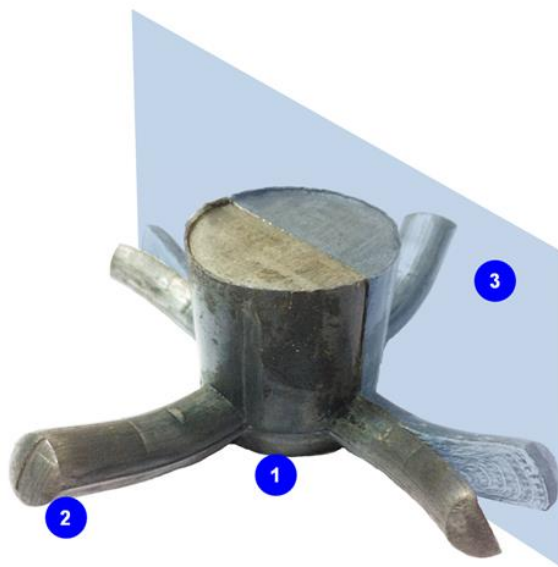
Особливістю розробленого інструменту є те, що його матриця інтегрована з контейнером і виконується розбірною. Така конструкція забезпечує видалення екструдованої частини після закінчення процесу. Таким чином, інструмент складається з двох основних частин: контейнера для заготовки з половиною вихідного каналу матриці і опори з другою половиною вихідного каналу матриці. Щоб запобігти небажаному відділенню деталей інструменту, на місці їх з'єднання передбачений замок, який можна затягнути гвинтами (не показано на рис. 5).

Розроблений інструмент дозволяє проводити деякі експерименти з вивчення течії металу всередині інструменту, а також можливості управління геометричними параметрами.

Як модельний матеріал для БНРККП був використаний свинець класу С1. Експериментальне дослідження з використанням цього матеріалу та розробленого інструменту (рис. 5) полягав у наступному:

- П'ять циліндричних заготовок діаметром 42 мм і довжиною 100 мм були попередньо розрізані вздовж.
- На площину з'єднання сталевую голкою наносилася координатна сітка з розміром комірок 2×2 мм.
- Пресування проводилось на лабораторному пресі номінальною силою 160 т кафедри ОМТ Національної Металургійної академії України.
- Пресування проводили без попереднього підігріву, при кімнатній температурі.

Були отримані зразки продукції типу "маточина зі спицями". Виріб, отриманий в експерименті, був розділений вздовж площини, яка проходила посередині двох протилежних спиць (рис. 6). Таким чином, деформація клітин сітки в процесі пресування чітко видна на відокремленій після пресування площині. Подальше дослідження течії металу проводили шляхом моделювання методом скінченних елементів, реалізованим в програмному пакеті QForm V8. Головною метою дослідження на цьому етапі було отримання геометричної подібності процесу та виробу типу "маточина зі спицями" і результатів експерименту за наступними критеріями:



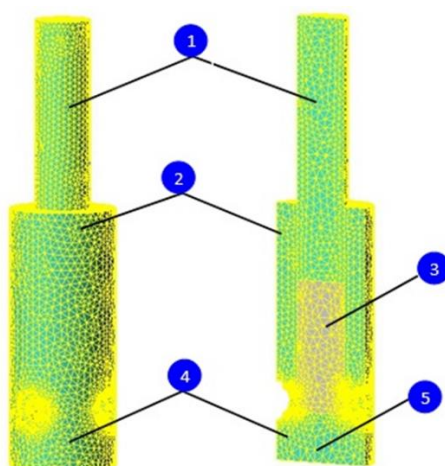
1 - витікання металу з матриці протягом часу, 2 - напрямок вигину спиць,
3 - зміна віртуальної координатної сітки

Рисунок 6 – Розділ експериментального зразка вздовж осі двох протилежних спиць

У процесі моделювання також оцінювались тиск і температурні умови процесу, а також тертя. Процес моделювання був таким:

1. Створення двовимірних креслень інструменту та заготовки в редакторі QDraft, інтегрованому в програмний продукт QForm.

2. Розробка геометричної моделі інструменту та заготовки відповідно кресленню та розбивка на сітку кінцевих елементів, виконана за допомогою модуля QShare (рис.7). У процесі моделювання сітка була автоматично перебудована в більш дрібну, що покращує точність розрахунків.



1 - пуансон, 2 - верхня частина контейнера,
3 - заготовка, 4 - нижня частина контейнера, 5 – опора
Рисунок 7 - Вихідна сітка скінчено-елементної моделі

3. Завдання граничних умов, які включають коефіцієнт тертя між інструментом та заготовкою, матеріал заготовки та інструменту, напрямок руху та силу, що впливає на пуансон, а також умови зупинки процесу.

4. Розрахунок процесу.

Перевірка адекватності моделі. При зазначенні граничних умов використовувались дані, отримані в результаті експерименту, отже перевірка адекватності моделі проводилася шляхом порівняння результатів моделювання та експерименту.

Оцінка результатів експерименту та моделювання

Зразок, отриманий в результаті моделювання, за характером та розміром вигину спиць подібний до експериментального. Крім того, моделювання показало, що характер течії металу протягом процесу ідентичний експериментальному. Головна відмінність - менший вигин спиць. Можливо, це спричинено умовами тертя та реологічними властивостями матеріалу. Вивчення цих параметрів є предметом подальших досліджень.

Екструзія натурального зразка з сіткою довела, що зміна координатної сітки у процесі моделювання якісно підтвердила експеримент (рис. 8). Кількісне порівняння змін координатної сітки в даній роботі не проводиться. Визначивши розмір сітки у комп'ютерній моделі та порівнявши її з розмірами сітки експериментального зразка, отримали граничне відхилення на рівні 4,5%, що є досить високим результатом для скінченно-елементних моделей. Таким чином, програмний пакет QForm V8 добре підходить для вивчення процесу БНРККП, а також для вивчення можливості використання цього виду екструзії при виробництві елементів типу “маточина зі спицями”.

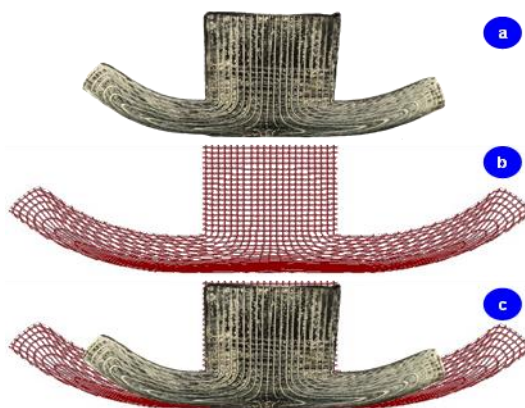


Рисунок 8 – Площина з'єднання зразка після БНРККП: а) - експеримент, б) моделювання в програмі QFormV8, с) накладання зображень а і б

Аналіз площини з'єднання зразка дозволяє виділити на ньому кілька основних ділянок (рис.9):

1. Всебічна зона стиснення, без зони пластичної деформації.
2. Ділянка зовнішньої поверхні заготовки, яка не була деформована і була виштовхнута внутрішніми шарами металу під час екструзії.
3. Область стабільного процесу; ця зона містить ділянки, які отримали різне співвідношення деформації зсуву і розтягнення.
4. Пластична частина осередку деформації (ПЧОД) характеризується плавним переходом від основних напружень зсуву через стискаючі до розтягуючих.

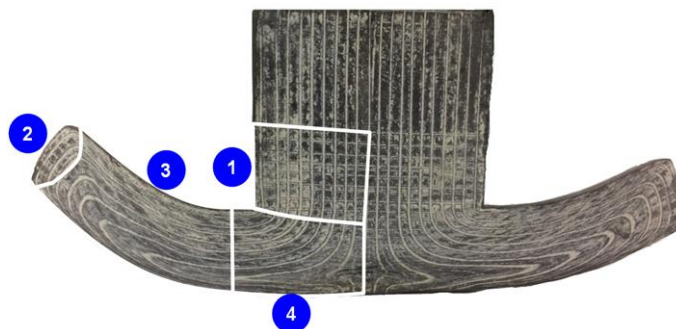


Рисунок 9 - Розташування типових ділянок на площині з'єднання зразка

Аналіз пластичної частини осередку деформації (ПЧОД) довів, що вона складається з певних зон і класифікується на основі переваги зсуву, стиснення або розтягнення. Таким чином, ПЧОД складається з наступних зон (рис. 10):

1. Площа поверхневих шарів, які деформуються чистим зсувом без розтягнення (площа чистого зсуву).
2. Область посилення впливу стискаючих напружень, характеризується деформаціями зсуву та розтягнення.
3. Площа стискаючих напружень при максимальному розтягненні внутрішніх шарів заготовки.
4. Область посилення впливу розтягуючих напружень. У цій зоні розтягнення шарів зменшується.
5. Область переважно розтягуючих напружень. Завдяки дії розтягуючих напружень в центральній частині заготовки утворюються дефекти. Межі цієї зони можна визначити критерієм повного зникнення поперечних дефектів поверхні (в даному випадку ліній сітки, що перетинаються).

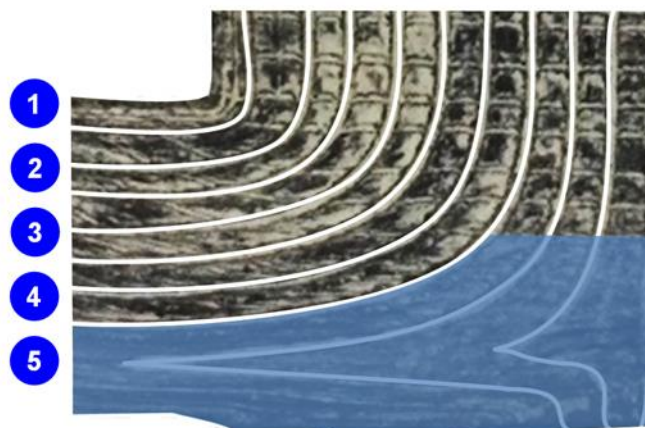


Рисунок 10 – Типові зони ПЧОД

Таким чином, експериментальна екструзія зразка з координатною сіткою дозволила визначити течію металу в площині з'єднання в цілому і в пластичній частині зони деформації зокрема. Результати цього дослідження можуть бути корисними для подальшого комп'ютерного моделювання, а також для необхідного пояснення перетворення структури в процесі БНРККП (у цій роботі не передбачено). Крім того, проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої конструкції інструменту для БНРККП.

Висновки

1. Процес багатоканальної екструзії становить інтерес для промисловості, оскільки дозволяє отримати готову деталь з потенційно високими механічними властивостями із циліндричної литої заготовки за один перехід.

2. Завдяки деформації зсуву та розтягування процес БНРККП має потенціал для керування механічними властивостями готового продукту.

3. Розроблено інструмент для БНРККП типу "маточина зі спицями", який було перевірено під час екструзії свинцевого сплаву С1.

4. В результаті екструзії були отримані якісні результати нерівномірності потоку матеріалу під час БНРККП. Встановлено, що центральні шари матеріалу деформуються легше, а шари, течія яких сповільнюється внаслідок контактного тертя, деформуються із затримкою.

5. Експериментальна екструзія з координатною сіткою, нанесеною на площину з'єднання двох симетричних частин заготовки, дозволила візуалізувати течію металу у площини стикування загалом і в пластичній частині зони деформації зокрема.

6. Вперше створена й перевірена скінченно-елементна модель процесу багатоканальної кутової екструзії в програмному пакеті QForm V8.

7. Результати моделювання процесу БНРККП показали хорошу збіжність з експериментальними результатами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Askeland D. The Science and Engineering of Materials : 6th Edition / Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. - CL Engineering, 2010. - 944 p. - ISBN 10 : 0495296023. - ISBN-13 : 978-0495296027.
2. Клименко П.Л. Упрочнение стали при горячей деформации / П.Л. Клименко. — Днепропетровск: Пороги, 2009. — 103 с.
3. Handbook of comparative world steel standards : 2 ed. p.cm / John E. Bringas, editor. - ASTM data series Publication, DS 67A, 2004. - 669 p. - ISBN 0-8031-3042-2.
4. EN 1090-2:2008. Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures.
5. Grydin O. Evolution of Microstructure, Properties and Texture of a Two-Phase Low-Carbon Steel at Cold Asymmetric Rolling / O. Grydin, A. Andreiev, A. Briukhanov, Z. Briukhanova, M. Schaper // Steel Research Int. - 2017. - V. 88. - I. 8. - <https://doi.org/10.1002/srin.201600397>.
6. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Валиев Р.З., Александров И.В. — М.: Логос, 2000. — 272 с.
7. Huang Y. Advances in ultrafine-grained materials / Huang, Yi, Langdon, Terence G. // Materials Today. - 2013. - V. 16. - № 3. - P. 85-93. - <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.004>.
8. Valiev R. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // Progress in Materials Science. - 2006. - V. 51. - I. 7. P. 881-981. - <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
9. Валиев Р.З. Развитие равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов / Валиев Р.З. // Металлы. - 2004. - № 1. - С. 15-22.
10. Угловое прессование магниевых сплавов на горизонтальном прессе / А.Н. Головкин, В.Н. Данченко, К. Краузе, Фр.-В. Бах // ДонНТУ. Наукові праці. "Металургія". - 2008. - Вип. 10 (141). - С. 231-235.
11. Markushev M. Structure and mechanical properties of commercial Al-Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing / Michael V. Markushev, Maxim Yu. Murashkin // Materials Science and Engineering: A. - 2004. - V. 367. - I. 1-2. - P. 234-242. - <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.237>.
12. Hasani A. Principles of Nonequal Channel Angular Pressing, Arman Hasani, László S. Tóth, Benoît Beausir // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. - 2010. - No. 132(3). - 031001 (9 pages). - <https://doi.org/10.1115/1.4001261>.
13. Lapovok R. The Role of Back-Pressure in Equal Channel Angular Extrusion / R. Ye. Lapovok // Journal of Materials Science. - 2005. - Vol. 40. - Iss. 2. - P. 341-346. - DOI:10.1007/s10853-005-6088-0.
14. Tóth L. Non-equal channel angular pressing of aluminum alloy / László S. Tóth, Rimma Lapovok, Arman Hasani, Chengfan Gu // Scripta Materialia. - 2009. - V. 61. - Iss. 12. - P. 1121-1124. - <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.09.006>.
15. Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes / I. Frolov, M. Schaper, O. Grydin, V. Andreiev, A. Tereschenko // Metallurgical and Mining Industry. - 2016. - No. 9. - P. 72-79. - http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2016_9/011FrolovIaroslav.pdf

REFERENCES

1. Askeland D. The Science and Engineering of Materials : 6th Edition / Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. - CL Engineering, 2010. - 944 p. - ISBN 10 : 0495296023. - ISBN-13 : 978-0495296027.
2. Klimenko P.L. Uprochnenie stali pri goryachey deformatsii / P.L.Klimenko. —Dnepropetrovsk: Porogi, 2009. - 103 s.
3. Handbook of comparative world steel standards : 2 ed. p.cm / John E. Bringas, editor. - ASTM data series Publication, DS 67A, 2004. - 669 p. - ISBN 0-8031-3042-2.
4. EN 1090-2:2008. Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures.
5. Grydin O. Evolution of Microstructure, Properties and Texture of a Two-Phase Low-Carbon Steel at Cold Asymmetric Rolling / O. Grydin, A. Andreiev, A. Briukhanov, Z. Briukhanova, M. Schaper // Steel Research Int. - 2017. - V. 88. - I. 8. - <https://doi.org/10.1002/srin.201600397>.
6. Valiev R.Z. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei / Valiev R.Z., Aleksandrov I.V.. - M.: Logos, 2000. - 272 s.
7. Huang Y. Advances in ultrafine-grained materials / Huang, Yi, Langdon, Terence G. // Materials Today. - 2013. - V. 16. - № 3. - P. 85-93. - <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.004>.
8. Valiev R. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // Progress in Materials Science. - 2006. - V. 51. - I. 7. P. 881-981. - <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
9. Valiev R.Z. Razvitie ravnokanalnogo uglovogo pressovaniia dlia polucheniia ultramelkozernistykh metallov i splavov / Valiev R.Z. // Metally. - 2004. - № 1. - S. 15-22.
10. Uglovoe pressovanie magnievykh splavov na gorizontálnom presse / A.N. Golovko, V.N. Danchenko, K. Krauze, Fr.-V. Bakh // DonNTU. Naukovi pratsi. "Metalurgii". - 2008. - Vip. 10 (141). - S. 231-235.
11. Markushev M. Structure and mechanical properties of commercial Al-Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing / Michael V. Markushev, Maxim Yu. Murashkin // Materials Science and Engineering: A. - 2004. - V. 367. - I. 1-2. - P. 234-242. - <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.237>.
12. Hasani A. Principles of Nonequal Channel Angular Pressing, Arman Hasani, László S. Tóth, Benoît Beausir // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. - 2010. - No. 132(3). - 031001 (9 pages). - <https://doi.org/10.1115/1.4001261>.
13. Lapovok R. The Role of Back-Pressure in Equal Channel Angular Extrusion / R. Ye. Lapovok // Journal of Materials Science. - 2005. - Vol. 40. - Iss. 2. - P. 341-346. - DOI:10.1007/s10853-005-6088-0.
14. Tóth L. Non-equal channel angular pressing of aluminum alloy / László S.Tóth, Rimma Lapovok, Arman Hasani, Chengfan Gu // Scripta Materialia. - 2009. - V. 61. - Iss. 12. - P. 1121-1124. - <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.09.006>.
15. Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes / I. Frolov, M. Schaper, O. Grydin, V. Andreiev, A. Tereschenko // Metallurgical and Mining Industry. - 2016. - No. 9. - P. 72-79. - http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2016_9/011FrolovIaroslav.pdf

Received 10.12.2022.

Accepted 27.12.2022.

**INVESTIGATION OF DEFORMATION ZONE PARAMETERS
AT MULTICHANNEL ANGULAR EXTRUSION**

The paper presents the results of research on the modern process of multichannel angular extrusion. Analysis of the literature has shown that the use of non-equal angular extrusion leads to a smaller size of microstructure in one pass than equal-angular compression. Accordingly, non-uniform angular extrusion is well suited for the formation and changing of fine-grained metal structure, and also significantly increases its strength, ductility and toughness due to shear deformation. However, the known methods of non-uniform angular pressing are mostly used for the manufacture of intermediate products (rods, strip), which to achieve the required level of properties require additional processing. Additional thermal or deformation processing could have a negative impact on the structure and properties of the product. Thus, the urgent task is to develop and study processes in which intense plastic deformation is the final operation. One of these processes is multichannel angular extrusion. The aim of the study is to determine the characteristics of the deformation zone and plastic flow of the metal in this process. The analysis of the grid has allowed to identify certain elements of the deformation zone. A special tool has been developed to provide multi-channel angular extrusion. The peculiarity of the developed tool is the matrix integrated into the container and made collapsible. This design provides removal of the extruded profile after processing. It has been found that the central layers of metal deform more easily, and the layers, the flow of which slows down due to contact friction between the tool and the workpiece, deform with a delay. The adequacy of the mathematical model of the process developed in the QForm © program was also confirmed with the help of experimental data.

Keywords: metal forming, multichannel angular extrusion, grain grinding, non-uniform deformation, deformation zone, grid, finite element method, mathematical model.

Зубко Юрій Юрійович – провідний фахівець управління науково-дослідних робіт ТОВ «ІНТЕРПАЙП Україна»

Фролов Ярослав Вікторович – докт. техн. наук, завідувач кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Кузьміна Ольга Михайлівна – канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Самсоненко Андрій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Бобух Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Zubko Yurii – Leading Specialist of the Research Department of INTERPIPE Ukraine LLC.

Frolov Yaroslav – Doctor of Technical Sciences, Head of the Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Kuzmina Olha – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Samsonenko Andrii – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Bobukh Oleksandr – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.