

Я.Ю.Бейгельзімер<sup>1</sup>,  
Р.Ю.Кулагін<sup>2</sup>,  
Ю.З.Естрін<sup>3</sup>,  
О.А.Давиденко<sup>1</sup>,  
В.Ю.Дмитренко<sup>1</sup>

## МЕХАНІЧНЕ ЗМІШУВАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ КРУЧЕННІ ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ

<sup>1</sup>Донецький фізико-технічний інститут ім.О.О.Галкіна НАН України,

<sup>2</sup>Технологічний інститут Карлсруе,

<sup>3</sup>Університет Західної Австралії

### Анотація

*Процес інтенсивної пластичної деформації представлений як життєздатний інструмент для змішування металів у твердому стані. Розглянуто перший етап процесу: а саме, механічне перемішування (stirring), коли дифузією можна знехтувати. Запропоновано метод оцінки якості перемішування. Він базується на параметрі, який кількісно характеризує рівномірність концентрації складових зразка в об'ємі. Висвітлено основні відмінності в перемішуванні твердих металів та рідин.*

**Ключові слова:** інтенсивна пластична деформація, механічне перемішування, композит, кручення під високим тиском, концентрація компонентів, оцінка якості перемішування

Кручення під високим тиском (КВТ) [1] є одним з основних методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД), що застосовуються для отримання субмікроструктурних матеріалів [2]. Схема КВТ представлена на рис.

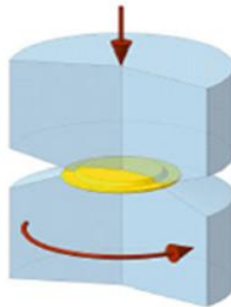


Рисунок - Схема кручення під високим тиском (КВТ)

Останнім часом, КВТ все частіше використовують для створення композитів і архітектурних матеріалів [3-5]. У певному сенсі, це повернення до витоків, оскільки КВТ було запропоновано П.Бріджманом для вивчення з'єднань і фазових перетворень різних речовин в умовах великого зсуву під високим тиском [6].

В основі синтезу лежить змішування (mixing) різних речовин, і в цьому плані осередок КВТ являє собою міксер. Пристрої з такою назвою широко застосовуються в металургії, хімії, фармацевтиці, харчової промисловості та ін. для змішування рідин і порошків. КВТ дозволяє змішувати різні матеріали у твердій фазі. В тій чи іншій мірі, ця функція властива і іншим процесам ІПД [5].

В даний час вже багато відомо про закономірності змішування рідин і порошоків [7]. Змішування ж матеріалів у твердій фазі, поки що, є слабо вивченим явищем. Для його аналізу необхідно скористатися результатами, отриманими при дослідженні перемішування рідких і сипучих середовищ, але при цьому врахувати принципову їх відмінність від пластичних матеріалів в фізичних механізмах деформації.

У роботах по змішуванню рідин чітко розрізняють два різних фізичних процеси, stirring та mixing. Перший з них являє собою чисто механічне перемішування, при якому дифузійно можна знехтувати. У другому процесі, змішування відбувається на атомному і молекулярному рівнях, а дифузія є основним його механізмом. Незважаючи на те, що кінцевою метою, як правило, є утворення нових сполук, яке відбувається за допомогою mixing, процесу stirring рідин приділяють не меншу увагу. Саме stirring повинен забезпечити зближення молекул і атомів різних речовин на такі відстані, щоб з'явилася можливість формування з'єднань. Зазвичай це не відбувається в усьому об'ємі суміші: навіть при дуже великому часі stirring вона може залишатися сильно неоднорідною в макроскопічних масштабах. З цієї причини постійно йде робота над вдосконаленням міксерів на основі результатів численних досліджень. Для глибокого розуміння stirring рідин необхідно було залучити такі сучасні розділи математики і фізики, як теорію динамічних систем і теорію хаосу.

Зараз в дослідженнях з перемішування в металах вивчають лише змішування речовин на атомному рівні, тобто mixing. Stirring металів не вивчається як самостійний процес, зокрема, не оцінюється його якість. Представлена доповідь присвячена саме stirring металів. Вперше аналізується його якість при обробці шаруватих композицій методом КВТ. З цією метою обґрунтовується чисельна міра ступеня механічного перемішування, заснована на параметрі Гіббса. Запропонована методика оцінки якості stirring може бути застосована при КВТ порошкових матеріалів, а також при аналізі процесів синтезу шаруватих і порошкових композицій іншими методами. У доповіді розглядаються шари, паралельні площині ковадл. Це пов'язано з тим, що відмінності в механізмах stirring рідких і пластичних середовищ в цьому випадку виявляються найбільш гостро. Принаймні, подібні схеми змішування не використовуються для рідин, проте, як показують експерименти, метод КВТ дуже ефективний при stirring металевих композицій.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A.P. Zhilyaev, T. G. Langdon. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / Prog. Mater. Sci. -2008.- V.53. P.893-979.
2. R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zehetbauer, Y. T. Zhu. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later / JOM.- 2016.- V.68. P.1216-1226.
3. Han J.K., Herndon T., Jang J.I., Langdon T.G., Kawasaki M. Synthesis of Hybrid Nanocrystalline Alloys by Mechanical Bonding through High-Pressure Torsion. / Advanced Engineering Materials.- 2020.- V.22(4). P.1-16.
4. R.Kulagin, Y.Beygelzimer, A.Bachmaier, R.Pippan, Y.Estrin. Benefits of pattern formation by severe plastic deformation / Applied Materials Today.- 2019.- V.15. P. 236-241.
5. Yan Beygelzimer, Yuri Estrin, Roman Kulagin. Synthesis of Hybrid Materials by Severe Plastic Deformation: A New Paradigm of ИПД Processing / Advanced Engineering Materials.- 2015.- V.17:12. P. 1853-1861.
6. Bridgman P.W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure // Phys. Rev., 1935. – V. 48. – P. 825-847.
7. Handbook of industrial mixing science and practice, Edited by Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. 1377 p.

**Бейгельзімер Ян Юхимович**, д.т.н., професор, головний науковий співробітник, Донецький фізико-технічний інститут ім.О.О.Галкіна НАН України, м.Київ, [yanbeygel@gmail.com](mailto:yanbeygel@gmail.com)

**Кулагін Роман Юрійович**, к.т.н., науковий співробітник, Інститут нанотехнологій, Технологічний інститут Карлсруе, м.Карлсруе, [roman.kulagin@kit.edu](mailto:roman.kulagin@kit.edu)

**Естрін Юрій Захарович**, к.ф.-м.н., почесний доктор РАН, професор, Університет Західної Австралії, Перт, [yuri.estrin@uwa.edu.au](mailto:yuri.estrin@uwa.edu.au)

**Давиденко Олександр Анатолійович**, к.т.н., старший науковий співробітник, Донецький фізико-технічний інститут ім.О.О.Галкіна НАН України, м.Київ, [dav76@ukr.net](mailto:dav76@ukr.net)

**Дмитренко Вікторія Юрівна**, к.т.н., вчений секретар, Донецький фізико-технічний інститут ім.О.О.Галкіна НАН України, м.Київ, [dmitrenko\\_v@ukr.net](mailto:dmitrenko_v@ukr.net)

## MECHANICAL MIXING OF METALS BY HIGH PRESSURE TORSION

### Abstract

*A severe plastic deformation process is presented as a viable tool for mixing of metals in solid state. A first stage of the process of mechanical mixing, viz. stirring, when diffusion can be neglected is considered. A method for assessing the quality of stirring is suggested. It is based on a parameter that characterizes the uniformity of the concentration of the constituents of a sample in the bulk in a quantitative way. Principal differences in stirring of solid metals and liquids are elucidated.*

**Keywords:** severe plastic deformation, mechanical mixing, stirring, composite, high pressure torsion, concentration of components, evaluation of stirring efficacy

**Beygelzimer Yan**, Professor, Principal Researcher, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O.Galkin, NASU, Kyiv, [yanbeygel@gmail.com](mailto:yanbeygel@gmail.com)

**Kulagin Roman**, PhD, Researcher, Institute of Nanotechnology, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, [roman.kulagin@kit.edu](mailto:roman.kulagin@kit.edu)

**Estrin Yuri**, Professor, The University of Western Australia, Perth, [yuri.estrin@uwa.edu.au](mailto:yuri.estrin@uwa.edu.au)

**Davydenko Oleksandr**, PhD, Senior Researcher, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O.Galkin, NASU, Kyiv, [dav76@ukr.net](mailto:dav76@ukr.net)

**Dmitrenko Viktoria**, PhD, Scientific Secretary, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O.Galkin, NASU, Kyiv, [dmitrenko\\_v@ukr.net](mailto:dmitrenko_v@ukr.net)