

## РОЗДІЛ II ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.77.01

DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(52)50

Бейгельзімер Я. Ю.  
Кулагін Р. Ю.  
Естрін Ю. З.  
Давиденко О. А.  
Дмитренко В. Ю.

### ЛИТОПОДІБНІ АРХІТЕКТУРИ, СФОРМОВАНІ МЕТОДАМИ ІНТЕНСИВНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

*Одна з найбільш ефективних концепцій сучасного матеріалознавства - матеріали з внутрішньою архітектурою (architected materials), полягає в максимально можливішому використанні тих резервів, які надає структура матеріалу по формуванню його властивостей. У статті описаний новий підхід до створення таких матеріалів, заснований на тому, що композиції з різних металів піддають великому зсуву під високим тиском. Для цього використовують добре розвинені в даний час методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД): кручення під високим тиском, рівноканальне кутове пресування, гвинтова екструзія тощо. Дослідниками показано, що ІПД-обробка призводить до міцного з'єднання компонентів композиції між собою та контрольованого формування в ній мультимасштабних структур. На нижньому масштабному рівні створюються наноструктури, головним елементом яких є нерівноважні висококутові границі зерен, товщиною близько 1 нм. На проміжних масштабних рівнях, з характерним розміром елементів порядку 1-100 мкм, формуються мезоструктури, подібні до тих, що спостерігаються в літосфері землі: складки, будини, вихрові структури, кінк-бенди, смуги зсуву та ін. Звідси і назва нового підходу - літоміметика. Є підстави вважати, що на цьому шляху можуть бути створені нові матеріали з високою в'язкістю руйнування і з властивостями, які зазвичай разом не поєднуються, наприклад: високою міцністю, високою пластичністю, низьким модулем Юнга, малою густиною, гарною біосумісністю та ін.*

**Ключові слова:** літоміметика, архітектурні матеріали, інтенсивна пластична деформація, кручення під високим тиском.

Один із найбільш ефективних сучасних підходів до створення нових матеріалів, який в англійській літературі називається architected materials (AM), полягає в цілеспрямованому формуванні структур мезомасштабу, що лежить між мікроскопічним та макроскопічним [1, 2].

Фактор структури добре відомий у матеріалознавстві, тут же йдеться про якість нової його ролі, яка стає провідною. На відміну від композитів, які також мають спеціально створені мезоструктури (волокна, шари, вclusions, сітки та ін.), AM характеризуються незрівнянно більшим їх різноманіттям. Багатий вибір мезоструктур створює передумови для кардинального впливу на властивості матеріалів. При цьому критерії краси та витонченості у їх дизайні відіграють далеко не останню роль, що відображено конотацією слова «архітектура».

Словосполучення «architected materials» з англійської перекладається як «архітектурні матеріали», що може створити враження про їх застосування виключно у будівництві. Насправді ж це зовсім не так. Абсолютні розміри мезоструктур можуть бути різними: від десятків міліметрів у великих об'єктах (будівельні конструкції, крила літаків і вітрогенераторів тощо) до десятків мікрон в деталях міні пристроїв.

У цій статті йдеться про металеві матеріали, архітектури яких подібні до структур Літосфери Землі. Підхід до їх створення нещодавно запропонований у роботі [3]. Він названий Літоміметикою і заснований на самоорганізації структури шаруватих металевих композицій при інтенсивній пластичній деформації.

Літоміметика базується на імітації процесів, що народжують дивовижні наскальні рисунки природи (рис. 1) [4]. Фізика картин Літосфери обумовлена спотворенням форми геологічних тіл (зв'язаних об'ємів породи, з близьким складом [4]). Під дією внутрішніх сил у твердій оболонці Землі вони пластично деформуються і руйнуються. Велику, визначальну часом, роль в цьому грає вкрай цікаве явище локалізації деформації [6]. Через всебічний стиск, у розриви, що утворюються, просуваються сусідні геологічні тіла, що утримує картину від розсіпання і призводить до змішування фарб. У результаті на картині виникають вихори, ніби скопійовані у Ван Гога, всілякі складки та інші химерні утворення.

Картини з характерними фрагментами, подібними до тих, що на рис. 1, виявляються у перерізі зразків, підданих інтенсивній пластичній деформації (ПД) [3]. Подібність при цьому не випадкова, та зумовлена спільністю фізичних процесів. Незважаючи на очевидну різницю між металами і гірськими породами, єдиними для них є реологічні моделі [7] і загальний термодинамічний принцип максимальної швидкості розсіювання механічної енергії [8], що спрямовує формування мезоструктур при пластичній деформації.



Рис. 1. Деформація м'яких відкладень при сейсмогенних зсувах басейну Мертвого моря [5]

Прикладів літоподібних структур дуже багато в статтях з кручення під високим тиском (КВТ) багатошарових металевих композицій. В даний час цей напрямок досліджень швидко набирає обертів, що відображає огляд [9]. Його метою є синтез гібридних нанокристалічних сплавів, а літоподібні структури, що мимоволі виникають, розглядаються тут лише як проміжні етапи на шляху до просторової однорідності.

При явно стохастичній природі літоподібні структури містять певні характерні елементи (рис. 2), об'ємна частка яких у зразку, при фіксованому його складі та параметрах КВТ, визначається величиною деформації.

З метою синтезу однорідних матеріалів компоненти композиції потрібно зблизити між собою на відстань дифузії, для чого їх необхідно добре перемішати. Прикладами цього є тонкошарові структури на рис. 2 д, е. На жаль, досягти хорошого перемішування при КВТ далеко не завжди можливо, навіть за дуже великої кількості обертів ковадл. Дійсно, нехай, наприклад, у процесі сформувалася структура типу «тверді включення-м'яка матриця» (рис. 2 в). Тоді наступна спільна деформація компонентів, що необхідна для продовження їх перемішування, можлива лише за певних умов. У разі занадто великої різниці у величині напружень плинускладових і недостатній об'ємній частці твердої фази, включення «плаватимуть» у матриці у вигляді недеформованих фрагментів. Подальша деформація композиції не підвищить ступеня перемішування її компонентів.

Визначення умов повного перемішування складових композиції при КВТ є найважливішим завданням при синтезі нанокристалічних гібридних сплавів. Тож рішення має спиратися на закономірності розвитку літоподібних структур. Нині вони маловідомі. Є лише одна робота [14], де еволюція таких структур чисельно імітується на основі моделі нелінійно-в'язкої рідини, та кілька публікацій [13, 15-17], в яких висловлюються гіпотези про механізми виникнення вихорів при КВТ. Сказане обґрунтовує необхідність дослідження літоподібних структур

у рамках все більш актуального напрямку синтезу гібридних нанокристалічних сплавів. Тож, чим привабливі металеві ПД-матеріали, що мають саме літоподібну архітектуру (ЛА)?

Поки що матеріалів з ЛА немає, тож їх властивості невідомі. Але є досить вагомі аргументи на користь того, що варто проводити роботи з одержання та вивчення таких матеріалів [3]. Першим кроком на шляху до цього буде виявлення закономірностей формування ЛА, оскільки лише спираючись на них можна створити контрольовану мезоструктуру. Її вплив на властивості належить з'ясувати, але можна стверджувати, що після великої деформації під тиском, компоненти ЛА-матеріалів матимуть СМК мікроструктуру та міцні зв'язки між собою як на атомному рівні, так і завдяки зачепленням (рис. 2 б, в, е). Звідси випливає, що в ЛА-матеріалів очікується висока міцність, на збільшення якої буде також працювати ефект зворотного напруження, що виявляється на межах різних компонентів композиції. Наявність у матеріалі одночасно твердих та м'яких складових дає добрі шанси на високу пластичність при розтягуванні. Структури типу складок твердого матеріалу забезпечують ефект геометрично індукованого деформаційного зміцнення [18]. Тонкошарові структури (рис. 2 д, е) можна використовувати для створення матеріалів з малою чутливістю до перевантажень при розтягуванні [19]. Такі структури повинні перешкоджати поширенню тріщин [20], забезпечуючи матеріалу високу тріщиностійкість. Блокові структури, типу вихорів (рис. 2 в) і шоколадного будинажу (рис. 2 г), можуть бути дуже корисними для різних фізичних додатків. Наприклад, формування магнітом'якого феромагнітного матеріалу у вигляді блоків, розділених шарами немагнітного матеріалу, з низькою електропровідністю, що дозволяє істотно знизити втрати енергії через вихрові струми в електромашині і трансформаторах [21].

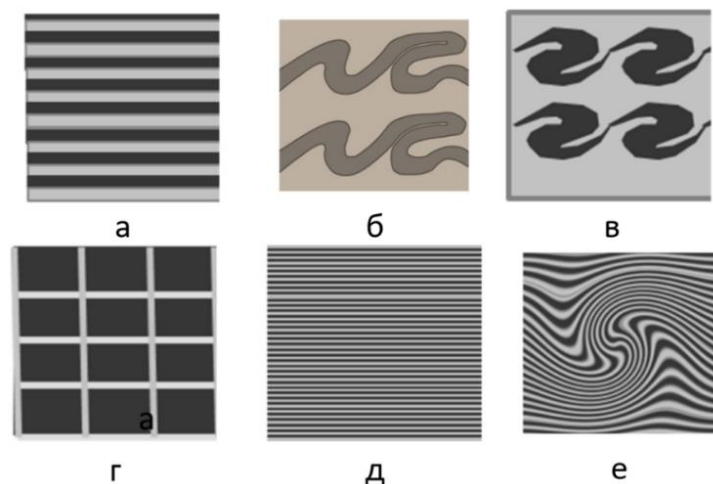


Рис. 2. Схеми деяких характерних елементів літоподібних структур, що виникають при КВТ композицій з шарів двох різних металів, що чергуються:

а – вихідна структура; б – складки; в – вихори; г – будинаж; д – тонкошарова структура; е – вихор із тонкошаровою структурою. (рисунок на основі структур з робіт [3, 10-13]. Чорним кольором позначена твердіша компонента композиції)

Завдяки своїй архітектурі, ЛА-матеріали мають більшу кількість ступенів свободи, ніж метали та сплави з однорідною мікроструктурою. Саме це дає архітектурним матеріалам потенційні переваги [22]. Але самі матеріали не є самоціллю: з них одержують вироби, застосовуючи процеси різання, обробки тиском та консолідацію порошків. Відомо, що обробка тиском змінює структуру матеріалів на всіх рівнях, що призводить до зміни їх властивостей. Якщо для металів та сплавів закономірності цих процесів всебічно вивчаються, завдяки чому вони вже відомі у багатьох випадках, то для архітектурних матеріалів такі дослідження взагалі поки що не проводяться. Поки невідомо, які властивості будуть мати вироби з будь-яких щільних архітектурних матеріалів, отримані, наприклад, штампуванням. З цієї причини дуже цікаві і важливі дослідження, спрямовані на вивчення впливу різних видів деформації на мезоструктуру та властивості щільних архітектурних матеріалів. З метою розвитку процесів їх обробки

тиском, для цих матеріалів необхідно отримувати ті ж характеристики, що і для металів: криві плинину при випробуваннях, поверхні пластичності, критерії руйнування тощо.

Наприкінці відзначимо можливість використання ЛА-матеріалів у вигляді порошків. Для цього потрібно спочатку отримати пласкі заготовки таких матеріалів (наприклад, за допомогою КВТ або ковзання під високим тиском [23]), які потім роздробити на порошок, використовуючи механізми для дроблення стружки. З отриманих таким чином ЛА-порошків можна виготовляти деталі традиційними порошковими технологіями, або методами 3D друку.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Ashby M. Designing architected materials. *Scripta Materialia*. 2013. 68. pp. 4-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.04.033>
2. Architected Materials in Nature and Engineering. Archimats. Estrin Y., Bréchet Y., Dunlop J., Fratzl P. Eds. Springer Nature, Switzerland AG. 2019. 445 p.
3. Beygelzimer Y., Kulagin R., Fratzl P., Estrin Y. Earth's Lithosphere Inspires Materials Design. *Advanced Materials*. 2020. 33 (3). p. 2005473. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202005473>
4. Haakon Fossen. Structural Geology. Cambridge University Press, Cambridge. 2010. 463 p.
5. URL: [https://www.reddit.com/r/geologyporn/comments/68uqiu/softsediment\\_deformation\\_within\\_seismogenic/](https://www.reddit.com/r/geologyporn/comments/68uqiu/softsediment_deformation_within_seismogenic/)
6. Rice J. R. The Localization of Plastic Deformation. *Proceedings of the 14th International Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Delft, Netherlands, 30 Aug 1976. pp. 207-220. <https://www.osti.gov/servlets/purl/7343664>
7. Nadai A. L. Theory of Flow and Fracture of Solids, Vol. 2. New York: McGraw-Hill Book Company Incorporated. 1963. 705 p.
8. Ziegler H. An Introduction to Thermomechanics. Elsevier North-Holland, Amsterdam, Netherlands. 1983. 370 p.
9. Han J-K., Herndon T., Jang J., Langdon T. G., Kawasaki M. Synthesis of Hybrid Nanocrystalline Alloys by Mechanical Bonding through High-Pressure Torsion. *Advanced Engineering Materials*. 2020. 22 (4). P. 1901289. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201901289>
10. Estrin Y., Beygelzimer Y., Kulagin R. Design of Architected Materials Based on Mechanically-Driven Structural and Compositional Patterning. *Advanced Engineering Materials*. 2019. 21 (9), p. 1900487. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201900487>
11. Beygelzimer Y., Kulagin R., Estrin Y., Severe Plastic Deformation as a Way to Produce Architected Materials. / *Architected Materials in Nature and Engineering*. Estrin, Y., Bréchet, Y., Dunlop, J., Fratzl, P. Eds. Springer Nature, Switzerland AG. 2019, pp. 231-255.
12. Kulagin R., Beygelzimer Y., Bachmaier A., Pippan R., Estrin Y. Benefits of pattern formation by severe plastic deformation. *Applied Materials Today*. 2019. 15, pp. 236-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.02.007>
13. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Yu., Mazilkin A., Straumal B., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion. *Materials Letters*. 2018. 222, pp. 172-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.03.200>
14. Pouryazdan M., Kaus B.J.P., Rack A., Ershov A., Hahn H. Mixing instabilities during shearing of metals. *Nature Communications*. 2017. 8. 1611. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01879-5>
15. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Y., Mazilkin A., Hahn H. Modelling of High Pressure Torsion using FEM. *Procedia Engineering*. 2017. 207, pp. 1445-1450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.911>
16. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Y., Mazilkin A., Hahn H. High Pressure Torsion: from Laminar Flow to Turbulence. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 194. 012045. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/194/1/012045>
17. Cao Y., Wang Y. B., Figueiredo R. B., Chang L., Liao X. Z., Kawasaki M., Zheng W. L., Ringer S. P., Langdon T. G., Zhu Y. T. Three-dimensional shear-strain patterns induced by high-pressure torsion and their impact on hardness evolution. *Acta Materialia*. 2011. 59, pp. 3903-3914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.015>
18. Bouaziz O. Geometrically induced strain hardening. *Scripta Materialia*. 2013. 68 (1), pp. 28-30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.08.008>
19. Beygelzimer Y., Estrin Y., Kulagin R. Synthesis of Hybrid Materials by Severe Plastic Deformation: A New Paradigm of SPD Processing. *Advanced Engineering Materials*. 2015. 17 (12), pp. 1853-1861. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201500083>
20. Cherepanov G.P. Fracture mechanics of composite materials. Moscow: Nauka, Main editorial office of physical and mathematical literature. 1983. 296 p. (in Russian).
21. Fitzgerald A.E., Kingsley C., Umans S.D. Electric Machinery. Sixth Edition. McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy. McGraw-Hill Higher Education, A Division of The McGraw-Hill Companies. 2003. 703 p.
22. Bréchet Y., Embury J.D. Architected materials: Expanding materials space. *Scripta Materialia*. 2013. 68 (1), pp. 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.07.038>
23. Fujioka T., Horita Z. Development of High-Pressure Sliding Process for Microstructural Refinement of Rectangular Metallic Sheets. *Materials Transactions*. 2009. 50 (4), pp. 930-933. DOI: <https://doi.org/10.2320/materials.MRP2008445>



**Beigelzimer Y., Kulagin R., Estrin Y., Davydenko O., Dmytrenko V. Cast-shaped architectures formed by methods of intensive plastic deformation.**

*One of the most effective concepts of modern materials science - materials with internal architecture (architected materials), consists in the maximum possible use of those reserves that the structure of the material provides for the formation of its properties. The article describes a new approach to the creation of such materials, based on the fact that compositions of different metals are subjected to high shear under high pressure. For this, the currently well-developed methods of severe plastic deformation (SPD) are used: torsion under high pressure, equal channel angular pressing, twist extrusion, etc. Researchers have shown that SPD treatment leads to a strong connection of the components of the composition with each other and the controlled formation of multiscale structures in it. At the lower scale level, nanostructures are created, the main element of which is non-equilibrium high-angle grain boundaries with a thickness of about 1 nm. At intermediate scale levels, with a characteristic element size of the order of 1-100 μm, mesostructures are formed similar to those observed in the earth's lithosphere: folds, boudins, vortex structures, kink bands, shear bands, etc. Hence the name of the new approach - lithomimetics. There is reason to believe that this way can be used to create new materials with high fracture toughness and properties that are usually not combined together, for example: high strength, high plasticity, low Young's modulus, low density, good biocompatibility, etc.*

**Keywords:** *Lithomimetic, architecture materials, severe plastic deformation, high pressure torsion.*

**Бейгельзімер Ян Юхимович** – д-р техн. наук, проф. ДонФТІ НАН України

**Beigelzimer Yan** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, DIPE

E-mail: yanbeygel@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1321-8565>

**Кулагін Роман Юрійович** – канд. техн. наук, ИИТ, ТИК.

**Kulagin Roman** – Candidate of Technical Sciences, INT, KIT.

E-mail: [roman.kulagin@kit.edu](mailto:roman.kulagin@kit.edu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9974-463X>

**Естрін Юрій Захарович** – канд. фіз.-мат. наук, почес. д-р РАН, проф., Університет Західної Австралії, Перт

**Estrin Yuri** – Professor, The University of Western Australia, Perth

E-mail: [yuri.estrin@uwa.edu.au](mailto:yuri.estrin@uwa.edu.au)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7784-5704>

**Давиденко Олександр Анатолійович** – канд. техн. наук, ДонФТІ НАН України

**Davydenko Oleksandr** – Candidate of Technical Sciences, DIPE

E-mail: dav76@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4303-6017>

**Дмитренко Вікторія Юрїївна** – канд. техн. наук, ДонФТІ НАН України

**Dmitrenko Victoria** – Candidate of Technical Sciences, DIPE

E-mail: dmitrenko\_v@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4085-8362>

Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна Національної академії наук України (ДонФТІ НАНУ), м. Київ

Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin (DIPE), Kyiv

Інститут нанотехнологій (ИИТ), Німеччина

Institute of Nanotechnology (INT), Germany

Технологічний інститут Карлсруе (ТИК), Німеччина

Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany

Університет Західної Австралії, Перт, Австралія

The University of Western Australia, Perth, Australia