



Перший експеримент із космічного матеріалознавства на борту МКС (MISSE box) — вплив радіації на матеріали (джерело NASA-MSFC)

# КОСМІЧНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕНЬ



**Олег Федоров**  
доктор фіз.-мат. наук,  
директор  
Інституту космічних досліджень  
НАН України-ДКА України,  
м. Київ

**В**ивчення фізико-хімічних процесів в умовах мікрогравітації — один із пріоритетних напрямків сучасних космічних досліджень, які в найближчій перспективі (до 2025 року) будуть виконуватися, в основному, на Міжнародній космічній станції (МКС). Особливість цього напрямку полягає у тому, що предметом досліджень є не космічні об'єкти, а відомі завдяки земній діяльності процеси, які відбуваються в унікальних умовах (невагомість, глибокий вакуум, космічне випромінювання, перепади температури). Серед пріоритетних галузей досліджень — вирощування кристалів, процеси перенесення у рідинах і газах, біотехнології [1, 2]. Зазначимо, що термін *"космічне матеріалознавство"* вживається саме у значенні науки про отримання матеріалів у космосі, а не як технологія виготовлення матеріалів для виробів космічної техніки.

Ідеологія цих досліджень зазнала, щонайменше, двох істотних переломних пунктів. Історично першою метою матеріалознавчої, а також технологічної діяльності на орбітальних комплексах було проголошено індустріалізацію космосу [3]. Проте десятиріч-

ця експериментальної роботи показало, що сподівання отримати унікальні матеріали, розробити принципово нові технології не дали результату. Причиною невдач стало нерозуміння механізмів перебігу багатьох процесів у рідинах, газах і сумішах, на яких базуються розроблювані технології. Тому основною метою експериментів на МКС стало дослідження цих процесів, а сама орбітальна станція отримала статус дослідницької лабораторії.

Проголошення програми EXPLORATION знаменує ще один поворот в ідеології орбітальних досліджень. НАСА відчутно втратило інтерес до раніше розробленої програми, зосередившись на тих напрямках досліджень, які забезпечать довготривалі пілотовані місії. Тому в сфері мікрогравітації пріоритет був наданий медико-біологічним експериментам. Відзначимо, що європейські та японські програми не зазнали принципівих змін, а невдоволення цих учасників викликано зменшенням часу на проведення запланованих досліджень через скорочення експедицій відвідування, забезпечуваних шатлами.

Перспективи матеріалознавчих експериментів визначаються, в основному, наступними очікуваннями:

— Отримати унікальні матеріали і технології їх створення, недосяжні в земних умовах.

— Визначити фундаментальні параметри процесів в умовах відсутності гравітаційної конвекції (наприклад, коефіцієнтів дифузії).

— З'ясувати механізми фізико-хімічних процесів, які є основою земних технологій (металургія, вирощування кристалів, отримання біопрепаратів).

— Створити наукові основи отримання матеріалів в інтересах подальшої діяльності з освоєння космічного простору.

Досвід українських дослідників у цій галузі (поряд з космічною біологією) є однією з основ вітчизняних космічних досліджень. Досліди зі зварювання, а також пайки, різання й обробки матеріалів є візитною карткою вітчизняних космічних технологічних експериментів. Проте в контексті сучасних задач і стану досліджень наша програма потребує серйозного переосмислення. Це пов'язано з іншими інтересами України, яка реалізує власну космічну програму, має власну космічну галузь.

Нова парадигма українських космічних досліджень у галузі матеріалознавства і технологій має враховувати наступні фактори:

\* здатність бути каталізатором розвитку пріоритетних напрямків вітчизняної науки і застосувань (нові матеріали, біопрепарати, фундаментальна фізика);

\* забезпечити гармонізацію цілей наукових і технологічних експериментів у космосі з завданнями розвитку вітчизняної космічної техніки і приладобудування;

\* стимулювати проривні рішення у сфері модернізації земних технологій (металургія, отримання й обробка матеріалів, біотехнології).

Стратегічне завдання цього напрямку досліджень може бути сформульоване як ефективне використання наявного досвіду і напрацьованих для отримання принципово нових знань і технологій у галузі вітчизняної матеріалознавчої науки і прикладних завдань.

При виборі пріоритетів у сфері розглянутих досліджень неодмінно потрібно враховувати обмеженість практичного застосування українського матеріалознавства в конкретних космічних місіях: у недалекому майбутньому ми навряд чи зможемо самостійно здійснювати масштабні дослідження у контексті пілотованого

космосу. Водночас, наш досвід і знання можуть вважатися одними з найпередовіших серед космічних держав. Тому єдиний шлях розвитку мікрогравітаційних досліджень — участь у довгострокових міжнародних програмах зі своїми відносно самостійними проектами, які можуть викликати інтерес партнерів.

Дотепер така тактика здійснювалась стосовно програми на Російському сегменті МКС і менш успішно — з європейськими партнерами. Крім того, великий потенціал має співробітництво і з іншими країнами — США (достатню пригадати серію спільних експериментів, проведених під час польоту *Л. Каденюка* на шатлі "Колумбія"), Китаєм, Японією, Індією. Складність такої взаємодії полягає у визначенні тематики, яка забезпечує власні інтереси.

Інший бік проблеми полягає у досягненні максимальної ефективності космічного експерименту. Відомо, що підготовка і здійснення такого експерименту інколи триває до десяти років, а результат може виявитися частковим і, нерідко, застарілим. Досвід практичної космонавтики останніх десятиріч показав, що в сфері орбітальних досліджень має реалізовуватися принцип ієрархічної підпорядкованості різних типів досліджень, коли космічний експеримент є верхівкою піраміди великої кількості робіт, підпорядкованих одній науковій задачі (рис. 1).

Невдачі багатьох космічних експериментів у галузі фундаментальної фізики і матеріалознавства пов'язані

саме з завищеними очікуваннями результатів дослідів в унікальних умовах невагомості. Водночас, недостатнє розуміння проблеми математичного і натурального моделювання призводило до негативного кінцевого результату. Найвідоміший приклад — дослідження процесів перенесення у рідинах в очікуванні відсутності конвективного перемішування. Виявилось, що термокапілярна і концентраційно-капілярна конвекція на поверхнях поділу фаз (ефект Марангоні) можуть призводити до складної конфігурації потоків у рідинах і результатного ефекту, сильнішого, ніж гравітаційна конвекція [4].

Коротко підсумовуючи очікування дослідників, пов'язані з умовами невагомості, можна навести у вигляді таблиці наступні напрямки робіт.

Варте уваги те, що деякі з них зовсім не виправдали очікувань: отримання унікальних структурних станів при затвердінні високотемпературного розплаву виявилось продуктивнішим на Землі. (Відзначимо, що в різних лабораторіях тривають дослідження з використанням левітаторів, сподіваючись досягти унікальних результатів).

Серед напрямків фізичних і матеріалознавчих робіт, які будуть проводитись у найближче десятиріччя, важливу роль відведено процесам кристалізації рідин і сумішей, пошукам нових шляхів удосконалення процесів кристалізації у космосі. Цей напрямок вважається одним із найперспективніших, що відображає запланований польотний час на МКС.

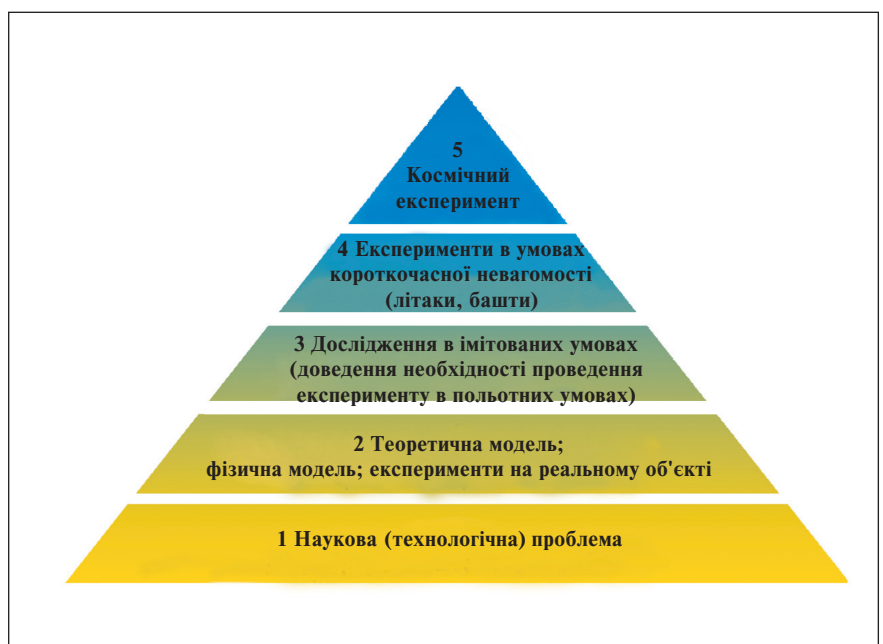


Рис. 1. Ієрархія підпорядкованості кроків розробки космічного експерименту

Таблиця 1. Перспективи космічних експериментів з матеріалознавства

Унікальні умови	Перспектива технологічного прориву
Безконтактні умови розплавлення	Нові фазові та структурні стани матеріалів
Відсутність конвекції у рідинах, газах, сумішах	Отримання кристалів з унікальними властивостями (чистота, розподіл компонент)
Відсутність змішування компонент з різною густиною	Нові композиційні матеріали
Превалювання поверхневих сил над об'ємними	Унікальне формоутворення і технологічне застосування (капілярні насоси...)

Нижче розглядаються можливі шляхи реалізації досліджень такого типу в українських програмах на найближчий період і дальшу перспективу. Доцільність розвитку такого напрямку випливає з факту існування в нашій країні відповідного сектора науки і промисловості (металургія, обробка й отримання різноманітних матеріалів методами кристалізації, зварювальні технології), які об'єктивно потребують проривних рішень у цій сфері. На користь розвитку цього напрямку свідчать і результати багаторічних досліджень, які проводились у різних інститутах матеріалознавчого профілю (інститути електрозварювання, проблем матеріалознавства, металофізики, кібернетики, монокристалів, фізики та інші).

Враховуючи отримані на орбіті результати, а також з огляду на заплановані найближчі роки роботи на МКС, основним напрямком до 2020-2025 року будуть фундаментальні дослідження процесів структуроутворення кристалічних матеріалів у космічних умовах, особливостей тепломасоперенесення в об'ємі розтопу, ролі поверхневих процесів, а також пошук ефективних способів реалізації зовнішніх впливів на розплави (чи суміші), що кристалізуються. Попередній досвід показав, що до цього часу немає позитивної відповіді на питання щодо доцільності отримання монокристалів напівпровідників, оптичних та інших практично важливих матеріалів на орбіті. Причому йдеться не про економічну ефективність (співвідношення ціна/властивість), а про принципову можливість отримати значущий результат на орбіті. Сказане меншою мірою стосується білкових кристалів, для яких тривають спроби виростити монокристали великих розмірів і отримати принципово новий результат при виготовленні деяких медичних препаратів.

Розглянемо конкретні перспективи і можливості досліджень процесу направленої кристалізації, який може служити основою багатьох практично важливих технологічних процесів у космосі. Наприклад, направлене затвердіння за схемою *Бриджмена* (рис. 2) дозволяє вивчати не тільки власне особливості вирощування монокристалів, але й отримувати інформацію про фундаментальні процеси структуроутворення при інших технологіях (зонне плавлення, отримання литих сплавів).

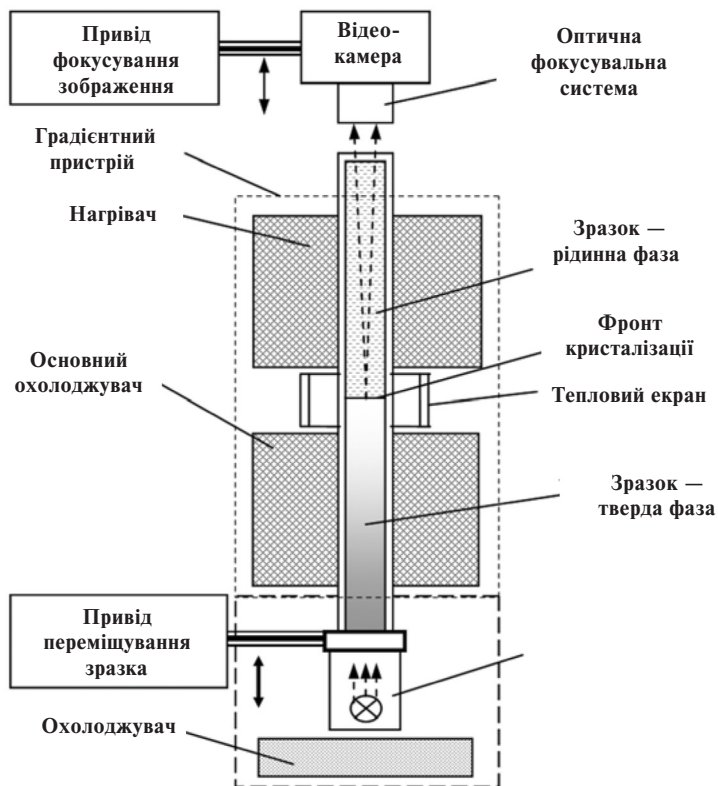


Рис. 2. Направлене затвердіння кристалів за схемою Бриджмена

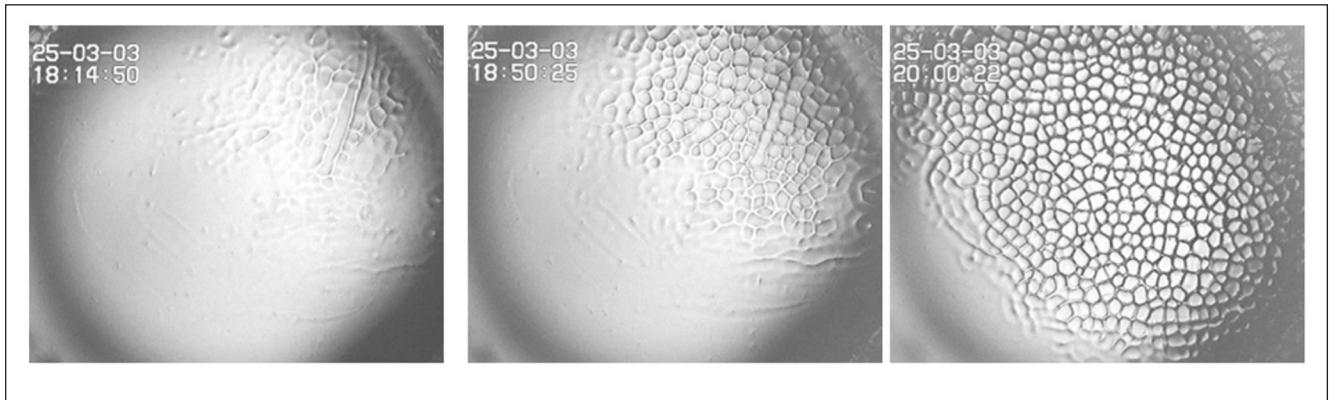


Рис. 3. Морфологія фронту кристалізації монокристалів в об'ємному зразку

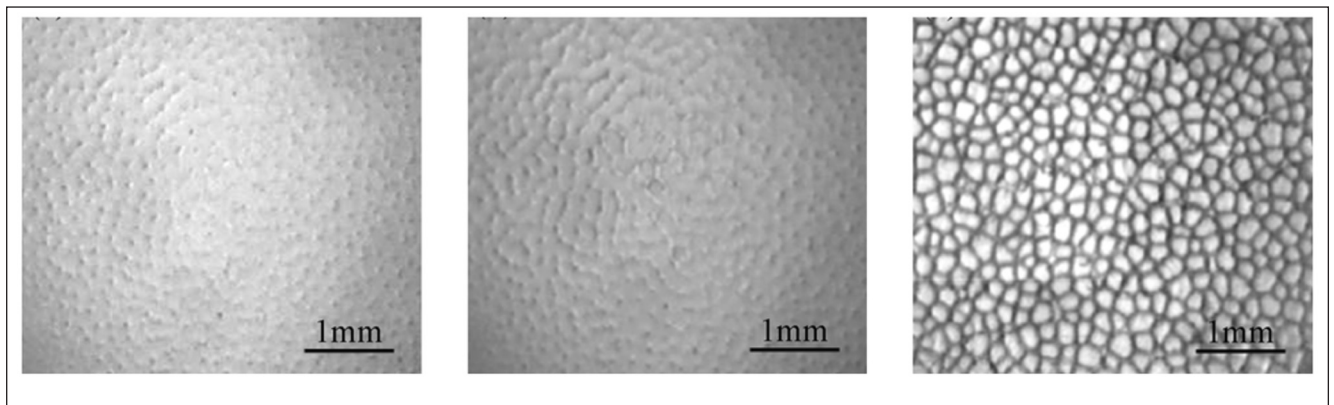


Рис. 4. Послідовність нестійких структур

Велика кількість експериментів у цій сфері показує, що можливості традиційних методів впливу на структуру (зміна градієнта, швидкості вирощування) практично вичерпані. Крім того, на думку багатьох дослідників [4] помітну роль відіграють неконтрольовані мікроприскорення (*j-jitter*), які суттєво впливають на тепломасоперенесення в об'ємі розплаву. Тому при дослідженнях кристалізації усе більше використовують зовнішні впливи (магнітні поля, перемішування та ін.)

Здається, що важливим етапом подальшого просування вперед буде дослідження впливу вібрації на матеріал, що кристалізується. Цей метод передбачають використати на перспективному устаткуванні МОРФОС-В на Російському сегменті Міжнародної космічної станції (очікуваний строк реалізації космічного експерименту — 2014-2015 роки). Ефективність методу зумовлена широкими можливостями впливу на перемішування розплаву перед фронтом, а також інформативністю методу в поєднанні зі зручністю реалізації на борту, а саме мале енергоспоживання, висока точність підтримки параметрів процесу вирощування (див. також рис. 3 і 4).

Цей етап досліджень дозволить відповісти на принципово важливе питання про перспективу отримання матеріалів із покращеними властивостями шляхом організації зовнішніх впливів.

Залежно від результатів цих досліджень стануть зрозумілими перспективи пошуків напрямків подальших матеріалознавчих робіт у космосі. Серед них, зокрема, — обробка й отримання практично важливих конструкційних матеріалів для космічного будівництва житлових модулів, функціональних матеріалів для підтримання життєзабезпечення і т. ін. Іншими словами, найближчі 5-10 років (термін активного функціонування МКС, а також час виконання безпілотних місій) повинні дати відповідь на питання, чи підтвердиться експериментально перспективність методів направленої кристалізації як основи нових космічних технологій.

#### Література

1. Scientific American. Looking up: Europe's Quiet Revolution in Microgravity Research. — 2008.
2. Реголь Л.Л. Космическое материаловедение / ВИНТИ ГКНТ СССР. — 1984.
3. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Индустриализация космоса. — М.: Наука, 1987.
4. Поверхность // Труды Первой российской конференции по космическому материаловедению. — 2001. — № 9.