

ВЛАСТИВОСТІ ТА ВИКОРИСТАННЯ БІ-КОМПОНЕНТНИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ СУМІШЕЙ У ЗАХИСНИХ ЕКРАНАХ

О. І. Герасимов, д.ф.-м.н., проф., Г. В. Кудашкін, асп.

Кафедра екології та охорони довкілля

gerasymovoleg@gmail.com

Розробка ефективних захисних екранів для захисту від ударів, радіації чи інших впливів є важливим напрямком у сучасних матеріалознавстві та інженерії. Бі-компонентні гранульовані суміші (БГС) привертають увагу завдяки можливості тонкого налаштування їхніх властивостей через регулювання мольних фракцій, розмірів частинок та міжчастинкових взаємодій.

Захисні екрани, створені на основі таких сумішей, демонструють високу ефективність у поглинанні енергії удару та зменшенні передачі вібрацій. Однак оптимізація складу і структури БГС для конкретних завдань залишається відкритою проблемою. Основні виклики включають прогнозування стисливості, пористості та здатності до абсорбції енергії.

Бі-компонентні суміші дозволяють створювати матеріали із заданими характеристиками шляхом регулювання: розміру частинок (дрібні частинки заповнюють пори між більшими, що знижує пористість ϕ і підвищує щільність); мольної фракції компонентів (варіація складу змінює механічні й абсорбційні властивості, впливаючи на енергію, що поглинається E_{abc} ; типу компонентів (поєднання матеріалів із різними модулями пружності сприяє кращому поглинанню енергії удару) [1, 2].

Найефективнішими для створення захисних екранів є суміші з високою щільністю ρ та низькою пористістю ϕ ; оптимальною мольною фракцією, яка забезпечує рівновагу між міцністю й поглинанням енергії; високим коефіцієнтом тертя між частинками, що знижує передавання ударної хвилі.

Наприклад, при зниженні пористості зростає ρ , що підвищує E_{abc} за рахунок збільшення маси частинок:

$$E_{abc} \propto \rho \cdot a ,$$

де a — коефіцієнт поглинання, який залежить від складу та щільності суміші.

Таким чином, регулювання мольних фракцій і пористості суміші дозволяє оптимізувати характеристики екранів. Бі-компонентні гранульовані суміші мають значний потенціал у створенні захисних екранів. Оптимізація їх параметрів (розміру, складу, щільності) забезпечує

підвищення ефективності поглинання енергії та зниження ваги конструкцій.

Для аналізу бі-компонентних гранульованих сумішей та їхньої ефективності в захисних екранах можна розглянути крім пористості також змішану щільність бі-компонентної суміші. Щільність суміші з двох компонентів може бути розрахована через мольні фракції компонентів:

$$\rho_{ef} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2},$$

де: ρ_{ef} — ефективна щільність суміші; w_1, w_2 — вагові частки першого і другого компонентів; ρ_1, ρ_2 — щільності першого і другого компонентів.

Ця формула враховує внесок кожного компонента у загальну щільність. Підбір оптимального співвідношення щільних і легких компонентів може підвищити коефіцієнт втрати енергії.

Також рівномірний розподіл маси і розмірів частинок забезпечує стабільне E_{abc} .

Якщо захисний екран використовується для зниження інтенсивності іонізуючого випромінювання, то критичною формулою для проектування екранів, що використовують високо щільні компоненти (наприклад, важкі метали або їх суміші) є:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu \rho l}{A}},$$

де I — інтенсивність випромінювання після проходження екрана; I_0 — початкова інтенсивність випромінювання; μ — масовий коефіцієнт поглинання для певного типу випромінювання (см²/г); ρ — щільність матеріалу екрана (г/см³); l — товщина екрана (см); A — атомний номер компонентів (враховується для матеріалів, які мають високий Z для екранування).

Для гранульованих екранів, які складаються з шарів бі-компонентних матеріалів оцінити сумарну стійкість екрана до механічного впливу можна за формулою:

$$\sigma_{ef} = \sum_{i=1}^N f_i \sigma_i,$$

де σ_{ef} — ефективна міцність екрана; f_i — частка компонентів у кожному шарі; σ_i — міцність i -го шару; N — кількість шарів [3, 4, 5].

Захисні екрани на основі таких сумішей демонструють високу ефективність у поглинанні енергії удару та зменшенні передачі вібрацій. Дослідження також показують, що гранульовані матеріали, як-от пісок, бентоніт та гравій, мають значний потенціал у радіаційному захисті завдяки пошаровій структурі, яка забезпечує високий коефіцієнт поглинання випромінювання. Модифікація складу таких матеріалів дозволяє підвищити їхню ефективність, використовуючи багат шарові моделі з різними поглинаючими властивостями кожного шару. Оптимізація складу БГС із використанням матеріалів, що містять важкі метали (барит, свинець), а також компонентів із хімічно зв'язаною водою (бентоніт), дозволяє значно підвищити радіаційно-захисні властивості екранів, знижуючи їх вагу та товщину [3, 6].

Дослідження БГС мають бути спрямовані на розробку методів точного прогнозування їхніх властивостей для специфічних застосувань.

Одна з можливостей тонкого налаштування їхніх властивостей через регулювання мольних фракцій, розмірів частинок та міжчастинкових взаємодій – це досконале вивчення стисливості. Стисливість гранульованих сумішей можна аналізувати через ізотермічний коефіцієнт стисливості β_T , який характеризує об'ємну реакцію матеріалу на зміну тиску:

$$\beta_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_{T'} ,$$

де V — об'єм, P — тиск.

В першому наближенні суміші можна порівняти з реальними газами, такими як гази ван-дер-Ваальса, де стисливість враховує міжмолекулярні взаємодії:

$$\beta_T = \frac{V_m - b}{RT} \left(\frac{\partial V_m}{\partial P} \right)_{T'} ,$$

де V_m — молярний об'єм.

Стисливість гранульованих сумішей, β_T може бути розрахована, наприклад, за допомогою моделі Карнахана-Старлінга-Мансурі (КСМ), яка застосовується для оцінки поведінки систем сферичних частинок:

$$nkT\beta_T = \frac{(1-\eta)^4}{1 + a\eta + b\eta^2 + c\mu^3 + d\eta^4} ,$$

де η — об'ємна фракція частинок; a , b , c , d — коефіцієнти, що відомим чином залежать від молярних часток компонентів суміші та відношення діаметрів їх частинок [4].

Ця модель дозволяє точно оцінити стисливість систем із високими густинами пакування, включаючи гранульовані матеріали, і враховує міжчастинкові взаємодії.

Застосування такої моделі, як, наприклад, КСМ дозволяє прогнозувати стисливість сумішей, адаптуючи їх до специфічних умов роботи захисних екранів, таких як підвищений тиск чи ударне навантаження. Це є основою для подальшої оптимізації їхніх властивостей і розробки нових ефективних матеріалів.

Таким чином, бі-компонентні гранульовані суміші (БГС) демонструють великий потенціал у створенні ефективних захисних екранів завдяки можливості налаштування їхніх властивостей. Регулювання мольних фракцій, розмірів частинок і типу компонентів дозволяє створювати матеріали із заданими характеристиками, що оптимізують щільність, пористість і здатність до поглинання енергії. Інтеграція матеріалів із різними поглинаючими властивостями та моделювання ефективності через пошарові структури відкривають нові можливості для підвищення радіаційно-захисних і ударостійких властивостей, водночас знижуючи вагу і товщину конструкцій.

Перелік посилань

1. Герасимов О.І., Андріанова І.С., Сідлецька Л.М., Співак А.Я., Курятников В.В., Кільян А.М. Технології радіаційного захисту з використанням гранульованих матеріалів. *Фізика аеродисперсних систем*. 2021. № 59. С. 194-200.
2. Герасимов О.І. *Фізика гранульованих матеріалів*: монографія. Одеса: ТЕС, 2015. 264 с.
3. Герасимов О.І., Сідлецька Л.М. Перспективи створення радіаційних захисних модулів на основі мікромеханічних (гранульованих) конгломератів. *Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»* (20-21 травня 2021 р., м. Київ). С. 129-133.
4. Gerasymov O., Spivak A., Andrianova I., Sidletska L., Kuryatnikov V., Kilian A. Micro-mechanical (granular) mixtures for environmental safety technologies. *E3S Web of Conferences*. Vol.234. Article No.00075.
5. Zhu J, Li W, Xia Y, Sahraei E. Testing and Modeling the Mechanical Properties of the Granular Materials of Graphite Anode. *Journal of The Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165. N 5. P. A1160-A1168.
6. Касаткіна Н. В., Левченко Л. О., Тихенко О. М. Проектування електромагнітних екранів композиційної структури для забезпечення стабільності функціонування об'єктів критичної інфраструктури. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Т. 4. № 62. С. 98–101.