

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

**О.І. Ніжельська¹, к.б.н., А.С. Шірінян¹, д.ф.-м.н., доц., О.Ю. Попов¹, д.ф.-м.н, доц.
Л.В. Маринченко², к.т.н., с.н.с.**

¹ Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

² КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Зміни властивостей матеріалів ядерних реакторів у результаті експлуатації в умовах радіації, високих температур, а також дії хімічних і механічних чинників є неминучими. Важливим завданням є виявлення пошкоджень і прогнозування безпечних режимів експлуатації композитних матеріалів реактора. Традиційно застосовують дослідження зразків-свідків і візуальний контроль оболонок, однак ці методи мають обмеження, зокрема залежність від оператора. Перспективним є використання фрактального аналізу (ФА) структури матеріалу, зокрема визначення фрактальної розмірності та лакунарності для оцінювання ступеня пошкоджень і дефектів, що дає змогу встановити ступінь розгерметизації, тип і розмір дефектів [1].

У нашому дослідженні запропоновано: (i) застосувати ФА для пошуку зв'язку між мікроструктурою композитного матеріалу реакторів і його теплопровідними властивостями; (ii) доповнювати експериментальні дослідження стандартизованими зображеннями; (iii) формувати базу даних для подальшого машинного навчання та автоматизації контролю. Оброблення зображень виконано незалежно від експериментальних вимірювань теплопровідності для підвищення об'єктивності результатів.

Запропонований підхід апробовано для оцінювання теплопровідності двофазних композитів ZrB_2 -C за допомогою ФА [2]. Зразки виготовлено методом високотемпературного реакційного синтезу [3]. Для кожного зразка проведено рентгеноструктурний аналіз, дослідження на електронному сканувальному мікроскопі в різних режимах і за однакових умов виміряно теплопровідність, яка продемонструвала значний розкид значень. Виявилось, що традиційні методи візуальної оцінки стану матеріалу не дають однозначних результатів, що зумовлює потребу в пошуку альтернативних підходів.

Зображення тієї самої поверхні сколу композитного зразка суттєво відрізнялися для SE- та BSE-режимів. Обґрунтовано, що для ФА більш придатними є саме BSE-зображення, які наближені до вигляду двовимірної матриці з чітким розподілом фаз, що зручно для бінаризації. Фрактальну розмірність D та лакунарність L розраховано за допомогою програмного забезпечення *ImageJ* і плагіна *FracLac* методом *box-counting* за стандартних налаштувань. Чим більше величина D (від 1 до 2 для площини), тим складніше візерунок зображення. Низький показник лакунарності свідчить про більш рівномірне розташування пустот, високий – про наявність великих пустот або/та неоднорідність їх локалізації. В цьому випадку «пустоти» – це одна з фаз композиту, залежно від інверсії зображення.

Результати засвідчили (рис. 1), що коефіцієнт теплопровідності k синтезованого композиту тим вищий, чим менше значення L : низька лакунарність характеризує більш однорідну та «зв'язану» більш теплопровідним графітом структуру композиту, що відповідає кращій передачі тепла.

Застосування фрактального підходу для чисельного опису мікроструктури двофазних керамічних композитів з однаковим хімічним складом дає змогу пояснити значний розкид експериментально виміряних значень теплопровідності та прогнозувати її на основі аналізу BSE-зображень поверхні сколу зразка.

Для фрактального аналізу можуть бути взяті будь-які зображення: оптичні, тепловізійні, ультразвукові, як мікро-так і макроскопічного масштабу, але з однаковим збільшенням. Використання ФА є доцільним у випадках, коли безпосереднє отримання зразків неможливе, зокрема для дистанційно отриманих зображень поверхні. Така ситуація може виникати, наприклад, у радіоактивних зонах, реакторах або за умов необхідності неруйнівного контролю. ФА може бути ефективним інструментом для виявлення атипових зразків, що виходять за межі основної кореляційної залежності. Значні відхилення фрактальних параметрів від загальної тенденції в межах досліджуваної групи свідчать про нетипову поведінку матеріалу (або його окремого фрагмента) та потребують додаткової перевірки.

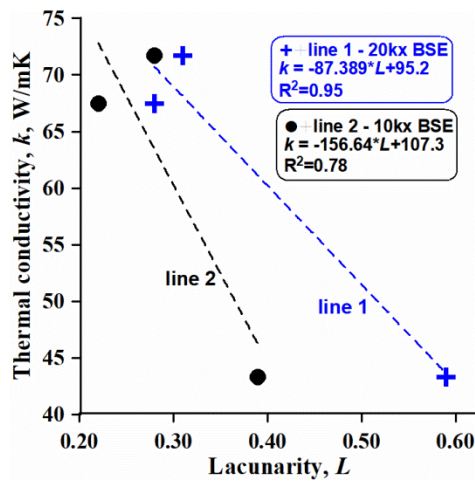


Рис. 1. Кореляція між коефіцієнтом теплопровідності та лакуарністю зразків з коефіцієнтами детермінації: $R^2=0.95$ для збільшення 20кx, $R^2=0.78$ для збільшення 10кx [2].

1. Буданов П.Ф., Хом'як Е.А. Удосконалення системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора. *Машинобудування*. 29 (2022) 32-49
2. Shirinyan A.S., Marynchenko L.V., Nizhelska O.I. A Fractal Approach to Evaluating the Thermal Conductivity of ZrB_2-C Composite Ceramic Materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 27(1) (2026) 52-61
3. Popov O., Dibrov V., Kuryliuk V., Vishnyakov V. Reactive and non-reactive hot pressing of $ZrB_2-SiC-C$ UHTCs: Structure, mechanical and thermal properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 46 (2026) 117839