УДК 667.64:678.026

Ігор Добротвор, д.т.н., доцент, Данило Стухляк, аспірант
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЯВІВ МЕЖ СТРУКТУР КОМПОЗИТІВ МЕТОДАМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

Об'єкт дослідження складають методи та інструменти для виявлення межі поділу фаз мікроструктур композитів. Оператори і оброблення візуального зображення розглянуті в роботі. Аналіз цих методів показують результативність використання запропонованих методів.
Ключові слова: розпізнавання, оператор, композит, коливність.

Igor Dobrotvor, Danylo Stukhljak

THE STUDY OF COMPOSITES STRUCTURES BORDERS MANIFESTATIONS BY PATTERN RECOGNITION METHODS

The object of investigation consists methods and tools for the detection of the composite microstructures boundaries. Operators and use of the visual image processing were discussed in the paper. The analysis of these methods revealed effects and deficiencies.
Key words: recognition, operator, composite, oscillation.

Ряд задач матеріалознавства описують процеси формування мікроструктур композитних матеріалів (КМ) в ході фізико-хімічних змін у полімерах [1]. Навколо часток наповнювача утворюються зони міжфазної взаємодії (ЗМВ) значної протяжності, які за своїми фізико-механічними властивостями відрізняються від матриці КМ в об’ємі [2].

Сприйняття двовимірних цифрових зображень $A(x, y)$тісно пов'язано із якістю представлення дрібних неспотворених деталей. Для цього необхідно, щоб із збільшенням фрагментів не відбувалося послаблення роздільної здатності зображення при виконанні 2D-інтерполяції функції $A(x,y)$просторового розподілу інтенсивності прояву пікселів у рядках і стовпцях матриці цифрового зображення. Важливим фактором ідентифікації об'єктів є також локалізація і відображення зон однієї і тієї же яскравості або ж шкали кольорів, навіть якщо такі області мають розміри декількох пікселів.

Для вирізнення меж довільно орієнтованих структур потрібні ізотропні алгоритми. Вони можуть бути непарного (градієнтні оператори) або парного (оператори Лапласа) порядку.Для двовимірної функції міри яскравості $A(x, y)$ її прирости (позитивні чи негативні) в напрямках осей Ох та Оу реєструються частинними похідними $A(x, y)_x$ і $A(x, y)_y$, що пропорційні швидкостям зміни яскравості у відповідних напрямках.

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial A(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A(x,y)}{\partial y}\right)^2} \qquad (1)$$

Перпендикулярність градієнта яскравості до межі може бути використана для простежування меж об’єкту, починаючи з деякого пікселя на цій межі. Таке відслідкування використовується в гістерезисній фільтрації максимальних пікселів. Суть гістерезисної фільтрації полягає в тому, що довгий стійкий межовий контур містить пікселі із особливо великим перепадом яскравості, і, починаючи з такого пікселя, контур можна простежити, переходячи по межових пікселям з меншим перепадом яскравості.

Для двовимірного варіанту аналогом другої похідної є лапласіан (4.5) - скалярний оператор

$$\nabla^2(\mathrm{A}) = \frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial y^2}. \qquad (2)$$

Знаходження меж на зображенні із використанням лапласіану може проводитися по аналогії з одномірним випадком: граничними визнаються точки, у яких лапласіан дорівнює нулю і по різні сторони від неперервної лінії, яку вони утворюють, він набуває різних знаків. Оцінка Лапласіану за допомогою лінійного фільтрування також виконується застосуванням гаусівської згладжувальної фільтрації, з метою зниження чутливості алгоритму до шумів.

Згідно алгоритму Кенні на першому етапі проводиться розмивання ціфрового зображення з метою видалення шумів із допомогою фільтру Гауса, дискретизоване значення якого з високою точністю наближається із допомогою маски (3):

$$\mathrm{M} = 1/159 \begin{pmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{pmatrix} \qquad (3)$$

Другим кроком є пошук модуля градієнта по формулі (1), у контурі межі залишають лише точки максимуму градієнта зображення A(x, y), а не максимальні точки, які лежать поруч із межею ігноруються. Потім із допомогою двох порогів видаляють слабкі границі. Результовні межі визначаються шляхом пригнічення усіх країв, які не зв'язані із визначеними межами.

Гаусівське згладжування і пошук Лапласіану можна здійснювати одночасно, а тому знаходження границь за допомогою лінійного фільтру проводиться швидше, аніж за допомогою алгоритму Кенні. Фільтр застосовується в системах, де має значення і якість результату (зазвичай поступається алгоритмам Кенні), і швидкодія. Для зменшення чутливості до неістотних деталей, з числа межових точок також можна виключити ті, величина градієнта у яких є меншою певного порогу.

Динаміка деяких процесів зшивання епоксипластів, зокрема поширення ЗМВ при наявності дисперсного чи волокнистого наповнювачів у композитних матеріалах може бути змодельована рівняннями, змінні яких міняються в просторах постійної кривини. За звичай під ними розуміють простори з евклідовою геометрією, проте існують і інші простори з кривиною відмінною від нуля і постійною для всіх точок простору. Такі геометрії реалізуються на добре відомих поверхнях евклідового простору.

Математичні моделі реальних процесів, зокрема задачах проблем кінетики мікроструктур епоксикомпозитів часто є зручним описувати диференціальними рівняннями, змінні яких вимірюються не лише в евклідовому просторі але і в інших просторах [3]. Розв'язок *u(X)* рівняння (4):

$$\Delta u + f(X, u, u'_x) = 0, \qquad (4)$$

де $\Delta u = \nabla^2 u$ - оператор Лапласа (2) по змінних, що визначають просторові координати тонких плівок КМ, *f* – складова, що характеризує внутрішні напруження матеріалу. Таким чином задача зміни знаку оператора (2) зводиться до більш загальної задачі про коливність.

Розв'язок $u(X)$ рівняння (4) , будемо називати коливним у деякій плоскій області, якщо у ній знайдеться замкнута вузлова лінія *Г*, і неколивним у противному випадку.

Більш продуктивним означенням коливності для рівнянь вищих порядків на наш погляд є підхід до вивчення розв'язків на многовидах. Так, для рівнянь еліптичного типу (не залежно від його порядку) вводиться на розгляд функція усереднення

$$M_r[u(X), P_0] = \frac{1}{\omega_n r^{n-1}} \iint\limits_{S_r} u(X)dS, \qquad (5)$$

де ω_n - площа *n* – вимірної сфери одиничного радіуса, S_r – сфера радіуса *r* з центром у деякій фіксованій точці $P_0 \in D.$В подальшому, де це не викликатиме сумнівів, усереднення (5) будемо записувати коротко: *M(r).*Тоді розв'язок *u(X)* рівняння (4) будемо називати коливним в необмеженій області із E^n, якщо для любого *r* в області $E_r = \{X : |X| \geq r\}$ функція *M(r)* є коливною.

Основним інструментом наших досліджень служитиме формула, яка пов'язує розв'язки рівнянь з частинними похідними і звичайними диференціальними рівняннями.

Має місце формула:

$$\frac{d}{dr}(r^{n-1}\frac{dM_r u}{dr}) = \frac{1}{\omega_n}\iint\limits_{S_r} \Delta u(X)dS, \qquad (6)$$

вперше доведена в роботі [3].

У сферичних координатах оператор Лапласа має вид:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{n-1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r}\cdot(\sum_{j=1}^{n}\frac{\frac{\partial}{\partial\theta_j}(\sin^{n-j-1}\theta_j\frac{\partial}{\partial\theta_j})}{q_j\sin^{n-j-1}\theta_j}), \qquad (7)$$

і радіальна частина його співпадає з лівою частиною формули (5):

$$L_r = \frac{1}{r^{n-1}}\cdot\frac{\partial}{\partial r}r^{n-1}\frac{\partial}{\partial r}.$$

Якщо для усереднення *M(r)* (5.3) розглядати лише сферично симетричні розв'язки, то застосовуючи оператор L_rдоM_r, отримаємо формулу в операторному виді:

$$L_r M = ML_r. \qquad (8)$$

Остання інтерпретація дозволяє застосувати означення коливності для дослідження інших типів рівнянь з частинними похідними відмінними від еліптичних. Для більш простого варіанту рівняння (4) з постійними коефіцієнтами (9) умови коливності (неколивності) отримуємо

$$Lu + pu = 0, \qquad (9)$$

шляхом приведення його до відповідних звичайних рівнянь. Рівняння (9) в просторі E^n буде коливним, якщо *p>0,* і неколивним у випадку $p \leq 0$. Останні результати дають можливість передбачення локалізації вузлових ліній (3) при деяких обмеженнях, а отже і меж мікроструктур ЗМВ у композитах.

Література

1.Stukhljak P. Investigationofthephenomenarevealedonphaseinterfaceinepoxide-composites / P.Stukhljak, I.Dobrotvor, M.Mytnyk, A.Mykytyshyn // Przetworstwotworzyw. Polymer processing. 2017 (styczen-luty) – N1 (175)/23, - P. 53-63.

2.Стухляк П.Д. Дослідження впливу природи наповнювачів і товщини покриттів на зміну градієнта кольорів та внутрішні напруження в епоксикомпозитах. / П.Д.Стухляк, І.Г.Добротвор, Р.З.Золотий, А.В.Букетов // Вісник КНУДТ, - №5, - 2006, - С. 82-87.

3.Добротвор И.Г. Условие колеблемости решений одного класса уравнений с бигармоническим оператором в пространстве E^n. Приближенные методы исследований нелинейных колебаний. ИМАН УССР, Киев, - 1983, - С.36-45.