



DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-6

УДК 620.18

І. М. Рибалко¹, д.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-3663-019X

А. В. Захаров¹, асп.

ORCID: 0000-0001-9894-7355

О. В. Тіхонов¹, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-7209-8375

С. А. Князев², к.т.н.

ORCID: 0000-0001-6422-3658

Г. О. Князєва², д.ф.

ORCID: 0000-0002-5290-7566

¹Державний біотехнологічний університет²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

e-mail: zakharovandrey1997@gmail.com, тел.: +380660838947

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИКО-МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Анотація. В даній роботі було розглянуто методи узагальненого підсумовування і послідовностей кольорів на фотографіях структур. Показано, що ці методи тісно пов'язані з описом твердості структури та іншими її характеристиками. Ефективність запропонованого методу полягає в тому, що у величезній кількості фізичних процесів має місце ефект автоколивань. Автоколивання виникають тільки в процесах зі зворотним зв'язком. При цьому вони можуть бути як періодичними, так і не періодичними. Зворотний зв'язок - це коли на стан системи впливають не тільки зовнішні чинники (для структур це здебільшого теплові), а й початковий внутрішній стан системи, пов'язаний із розсіюванням енергії.

Ключові слова: моделювання, гістограми, оптико-математичний опис, мікроструктура, структуроутворення, матеріалознавство.

Постановка проблеми. Наплавлення є одним із найпоширеніших методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих механізмів сільськогосподарської техніки. Відомо, що зносостійкість поверхні в умовах механічного зношування в основному визначається її структурою і фазовим складом. Кожен тип зносу має певну комбінацію структури та фазового складу для забезпечення максимальної зносостійкості поверхні.

Процес нанесення покриття має вирішальний вплив на структуру покриття та реалізацію зміни фази. Великі варіації хімічного складу наплавлених шарів залежать від співвідношення основного і наплавлювального матеріалів, високих температур нагріву в діапазоні швидкостей охолодження. Це призводить до різних структур і фазових станів у поверхневих шарах з одного і того ж матеріалу.



Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі запропоновано математичні моделі, що описують фазові перетворення у зварних з'єднаннях [1-13]. Ці моделі дають змогу прогнозувати структури без великих експериментальних досліджень. Ця методика дозволяє досліджувати отримані структури і виявити відсоток утворених фаз і в кожному конкретному випадку та аналізувати інші параметри.

Мета дослідження. Метою даної роботи є моделювання утворення структур за допомогою оптико-математичних описів їх змін при введенні модифікуючих домішок, з урахуванням автоколювань.

Основна частина. Запропоновано програму розрахунку узагальнених кольорів.

Програма заснована на залежності [11-14]:

$$s_{i+1} = s_i + u_i(c_i - s_i) \quad (1)$$

де c_i - колір точки на фотографії;

u_i - коефіцієнт підсумовування;

s_i - узагальнений колір попередньої точки;

s_{i+1} - узагальнений колір даної точки.

Наведена формула придатна не тільки для дійсних, а й для комплексних чисел і матриць. У програмі передбачено обмеження нижньої та верхньої меж кольорів. Ці обмеження відразу вносять нелінійність у перетворення кольорів (1), так звана рекурсивна формула підсумовування. У ній наступний стан залежить від попереднього. У певному сенсі Марковський процес, який може мати фізичний сенс. Відомо, що не всякий Марковський процес є автоколюванням [15].

Щоб формула (1) стала зрозумілішою, наводимо докладний розгляд від сканування структуроутворення по горизонталі на прикладі 3 послідовних точок $i, i+1, i+2$. Для скорочення опису назвемо ці точки 1, 2, 3. Припустимо $s_1 = c_1$. Тоді $s_2 = c_1 + u_1(c_2 - c_1)$. В цьому випадку формулу для $s_3 = s_2 + u_2(c_3 - s_2)$ замість s_2 потрібно підставити $c_1 + u_1(c_2 - c_1)$ тобто, залежність для s_3 перетвориться на $c_1 + u_1(c_2 - c_1) + u_2[c_3 - c_1 - u_1(c_2 - c_1)] = u_2c_3 + u_1(1 - u_2)c_2 + (1 - u_1)(1 - u_2)c_1$.

За будь-якого $n > 1$, згідно з (1), отримаємо:

$$p_n = u_n;$$

$$p_{n-1} = u_{n-1}(1 - u_n);$$

$$p_{n-2} = u_{n-2} \prod_{j=n-1}^n (1 - u_j);$$



$$p_{n-i+1} = u_{n-i+1} \prod_{j=n-i+2}^n (1-u_j); \quad (2)$$

$$p_2 = u_1 \prod_{j=2}^n (1-u_j);$$

$$p_1 = \prod_{j=1}^n (1-u_j).$$

Тут

$$\sum_{i=1}^n p_j = 1;$$

не залежить від u_j .

Можна записати у зворотному порядку

$$q_1 = u_1;$$

$$q_2 = u_2(1-u_1);$$

$$q_i = u_i \prod_{j=i}^{i-1} (1-u_j), \quad (3)$$

$$q_{n-1} = u_{n-1} \prod_{j=i}^{n-2} (1-u_j);$$

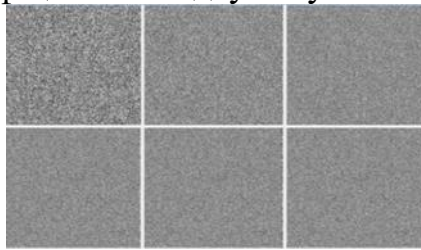
Більше того, якщо в якості u_j , наприклад, використовувати матрицю розміром n на n , то отримані матриці p_j визначатиме узагальнений метод підсумовування векторів розмірності n

Необхідно тільки дотримуватися правил множення послідовності матриць, або зліва, або справа. Якщо прийняти гіпотезу автоколивань, то потрібно за допомогою формули (1) спробувати змодельювати рисунок, схожий на реальну структуру досліджуваного матеріалу. Для цього беремо довільну структуру, що складається з випадкового набору кольорів і за допомогою підбору коефіцієнтів підсумовування отримуємо потрібний рисунок. Ці коефіцієнти в моделі відіграватимуть роль нелінійних перетворювачів безперервного зовнішнього впливу в переривчастий процес.

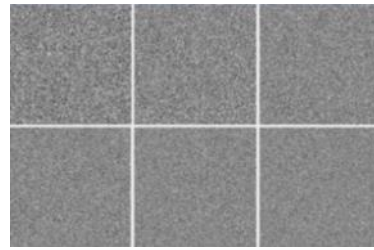
У цьому матеріалі представлено рисунки за двома програмами: vrek-43 і vrek-42 (див. рис 1).

На кожному рисунку за програмою vrek-43 один і той самий коефіцієнт підсумовування. Там стоять відповідні написи. Крім того, розрахунок повторювали кілька разів по 5 рисунків. Було зроблено багато циклів для кожного варіанта. Використовували випадки розгляду перетворення кольорів, коли використовували аналіз 5, 10 точок посліпль. Кілька разів розрахунок проводили для збіжності до граничної структури. На рисунках наведено результати останнього розрахунку.

Згідно з наступною програмою vrek-42, у якій чергування коефіцієнтів підсумовування на кожному рисунку йде спочатку по горизонталі, потім по вертикалі, отримали чіткіші структури. На рисунках 1 і 2 навіть проявилися натяки на зерна. При цьому розмір зерна чітко проявляються від збільшення числа послідовних точок у формулі (1). рисунки 2-4 вийшли вже без виявлення зерен. Для них характерна менша різниця між вертикальним і горизонтальним коефіцієнтом підсумовування.



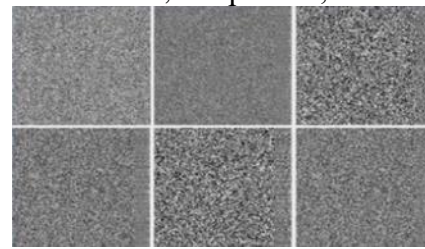
a
 $u_1=0,05$



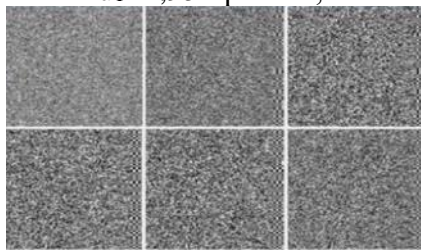
б
 $u_1=0,05$ при $k=1,35$
 $u_1=1,95$ при $k=2,4$



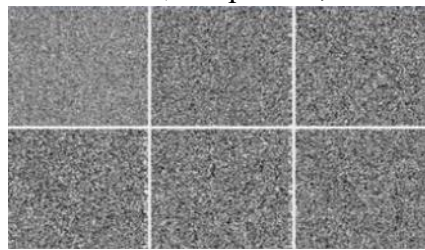
в
 $u_1=0,05$ при $k=1,35$
 $u_1=1,95$ при $k=2,4$



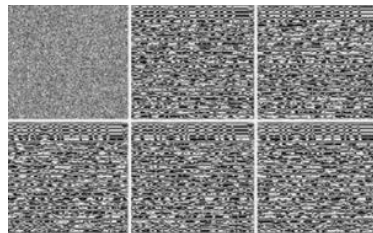
г
 $u_1=0,05$ при $k=1,35$
 $u_1=1,95$ при $k=2,4$



д
 $u_1=0,05$ при $k=1,5$
 $u_1=1,95$ при $k=2,4$
 $u_1=1$ при $k=3$



ж
 $u_1=0,05$ при $k=1,5$
 $u_1=1,95$ при $k=2,4$
 $u_1=1$ при $k=3$



з
 $u_1=5; u_g=0,05; u_v=1,95$

Рис. 1. Моделювання структур за різними програмами Vrek-43 і Vrek-42



Наведені й оцінені рисунки за програмою vrek-42 показано не тільки для отриманого вигляду структури, а й щоб перевірити, чи правильна їхня відповідність вихідній: 1-й рисунок майже такий, як 3-й, а 2-й майже такий, як 4-й. 1-й і 3-й отримані після підсумовування по горизонталі. 2-й і 4-й отримані після підсумовування по вертикалі. Є ще 0-й рисунок Він зроблений для горизонтального коефіцієнта підсумовування після 4-го разу розрахунків, тоді як інші після 5-го разу ітерацій.

Кожна точка фотографії виходить після розрахунку за формулою (1), наприклад, 9 наступних точок по горизонталі. Обходимо послідовно всі точки фотографії. Отримуємо новий масив кольорів. Потім для нового масиву кольорів кожна точка фотографії виходить після розрахунку за формулою (1), наприклад, 9 наступних точок по вертикалі. Обходимо послідовно всі точки фотографії. Отримуємо новий масив кольорів. Видаємо на екран перший із 5 рисунків. Потім проводимо обробку аналогічно 2-го, ..., 5-го рисунків. Потім знову проводили обробку 1-го, ..., 5-го рисунків. Рисунок у цьому разі буде мало схожий на вихідну випадкову структуру. Таких рисунків можна отримувати безліч разів.

На вибіркових рисунках наведено різні варіанти і періоди розрахунків, які відображають різну якість модельованих структур.

Розглянемо операцію підсумовування. Узагальненим середнім показником є $c(n)$, яка являється величиною [15]:

$$c(n) = \sum_{j=1}^n p_j c_j, \quad (4)$$

де c_j - послідовність кольорів на фотографії структури;

n - кількість розглянутих точок;

p_j - вагові множники, що обов'язково підкоряються заданій умові.

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1 \quad (5)$$

Як правило вагові множники мають бути додатними.

Розберемо деякі приклади узагальнених сум. Найпростіший, коли:

$$p_j = \frac{1}{n}, \quad (6)$$

тобто, не залежить від j .

У цьому випадку узагальнена середня є просто арифметичною середньою. Наведемо ще 4 випадки, які будуть використані в їхніх



дослідженнях. У прикладах введено додатковий індекс від 1 до 4, що належить до ступеня числа k .

Позначимо:

$$P_{1j} = \sum_{k=1}^j k \quad (7)$$

$$P_1 = \sum_{j=1}^n P_{1j} \quad (8)$$

Тоді для виконання умови (2):

$$p_{1j} = \frac{P_{1j}}{P_1} \quad (9)$$

Зауважимо для подальшого, що в цьому прикладі за великих порядків величини $P_{1j} \in \frac{1}{j}$. Якщо j прагне до нескінченності, то сума цих величин має порядок $\ln j$, і теж прагне до нескінченності. Для послідовностей p_{1j} , що мають таку властивість, формула (4) називається регулярним методом підсумовування.

У роботі розглядалося ще три приклади, що мають написані вище властивості:

$$P_{2j} = \sum_{k=1}^j k^2 \quad (10)$$

$$P_2 = \sum_{j=1}^n P_{2j} \quad (11)$$

$$p_{2j} = \frac{P_{2j}}{P_2} \quad (12)$$

$$P_{3j} = \sum_{k=1}^j k^3 \quad (13)$$

$$P_3 = \sum_{j=1}^n P_{3j} \quad (14)$$

$$p_{3j} = \frac{P_{3j}}{P_3} \quad (15)$$

$$P_{4j} = \sum_{k=1}^j k^4 \quad (16)$$

$$P_4 = \sum_{j=1}^n P_{4j} \quad (17)$$

$$p_{4j} = \frac{P_{4j}}{P_4} \quad (18)$$

Використовуючи метод Вороного (його ще називають методом Нерлунда, або N-методом, або W-методом) маємо [16]:

$$c_v = \sum_{j=1}^n p_{n-j+1} c_j \quad (19)$$

На наведених на графіках рис. 2 чорний колір належить до вагових множників $p_{1j}, p_{2j}, p_{3j}, p_{4j}$. Червоний колір відноситься до графіків вагових множників, оцінених методами Вороного $p_{1,n-j+1}, p_{2,n-j+1}, p_{3,n-j+1}, p_{4,n-j+1}$. Графіки побудовано для $n=1000$. Позначення графіків здійснюється зверху вниз, зліва направо.

Згідно з формулою методу Вороного, це арифметичне середнє ϵ для 4 наведених вище прикладів. Одна й та сама послідовність кольорів не дає однакових узагальнених середніх у цьому випадку. Виняток становлять випадкові рівномірно розподілені послідовності кольорів. Для них незалежно від методу підсумовування узагальнений колір за більших n з точністю 0,1 дорівнює 128 з 256. Тобто, відповідає лише половині від 256.

Метод Вороного має властивість спільності: якщо збільшувати число точок до нескінченності і узагальнена сума має межу, то ця межа не залежить від послідовності: P_{n-j+1} .

Друга властивість методу Вороного полягає в такому. Якщо послідовність кольорів впливає з аналітичних (нескінченно диференційованих) функцій, то узагальнена сума методу Вороного має межу. Для фотографій структур остання властивість не має місця. Але проте використання методу Вороного (19) з його методом (4), що виходить з нього, дає можливість чисельного порівняння середніх між собою, що підвищує можливість оцінки залежності твердості від цих параметрів.



Рис. 2. Порівняння графіків побудованих за відомими методами та методом Вороного (Voron-13)



Крім 2 формул (4) і (19) розрахунку узагальнених середніх кольорів, є ще величезна кількість й інших чинників, що мають властивості, схожі на залежність (6), і з описом регулярності, хоча є сумніви, чи завжди він потрібен, особливо за невеликих значень n .

Як виявилось, питання про великі й малі n і регулярність становить значний інтерес. Його можна розв'язати тільки дослідним шляхом. Тому і в цьому випадку будемо шукати залежність твердості та зносостійкості від факторів, що належать до узагальнених середніх показників.

За більших n доводиться збільшувати кількість факторів за рахунок показників узагальнених середніх і пов'язаних із ними розкидів навколо середніх значень.

Результати досліджень. Розглянуті вище залежності припускають одновимірність послідовності точок зі своїми кольорами. Насправді ж на фотографії зображено точки на площині. Можна довести, що якщо повторно застосовувати один і той самий метод підсумовування, наприклад, (4) або (19), спочатку в горизонтальному, а потім у вертикальному напрямку, то отримаємо один і той самий результат. Але якщо підсумувати в горизонтальній площині за формулою (4), а потім отриману послідовність за формулою (19), то отримаємо інший результат. Аналогічно, якщо по горизонталі підсумувати за (19), а потім отриману послідовність за (4), то отримаємо третій результат. Якщо ж отриману послідовність підсумувати за (19), то отримаємо четвертий результат. Одночасно із середніми можна отримувати 4 показники значень розкиду відносно середніх. Разом, на кожен із 4 за (9), (12), (15), (18) методів підсумовування отримаємо $4 \times 4 = 16$ середніх і стільки ж відхилень від середнього.

Крім того, для методу середніх арифметичних (6) також підраховані й відхилення для кожної фотографії.

Ці результати показують, що підсумовування за великими n має фізичний сенс. Особливо слід відзначити аргументи під номерами 12 і 13, що стосуються арифметичних середніх і відхилення від них. Ці номери трапляються в переважній більшості в розрахунках з найбільшими і близькими до них коефіцієнтами кореляції. За малих n доводиться збільшувати число факторів за рахунок варіювання числа цього показника. У роботі воно змінювалося від 2 до 10 за одного й того самого методу підсумовування (9). Складність завдання за малих n полягає в тому, що різниці середніх за (4) і (19) для деяких структур малі. А за різницями методів (4) і (19) будуються гістограми, за якими розраховують середні показники і відхилення. Для коротких гістограм важко очікувати помітної кореляції.

Результати виконаних розрахунків та оптико-математичний опис структуроутворення наведено на рис. 3.

Розрахунок середніх і відхилень проводили в горизонтальному і вертикальному напрямках. Розглядали 9 гістограм по горизонталі, і 9 гістограм по вертикалі, які чергуються одна з одною. Разом, 18 гістограм.

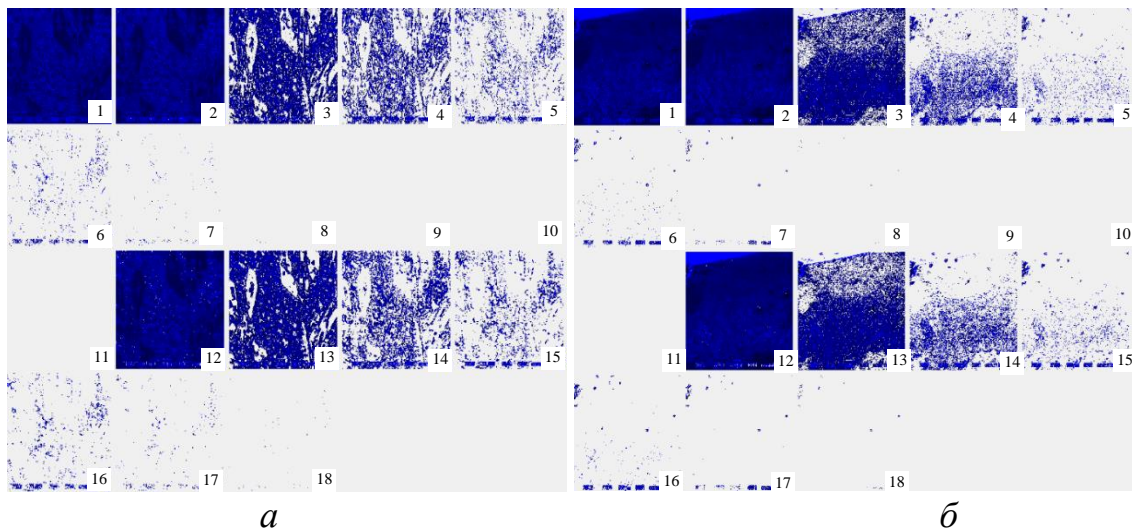


Рис. 3. Гістограми абсолютної величини різниць за $n=5$ між узагальненими середніми показниками з коефіцієнтами підсумовування (9) за методом (4) і (19); наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням бентонітової глини: а – середина наплавлення; б – поверхня

Із 18 гістограм отримуємо 36 чисел: 18 середніх і 18 відхилень. Це використано для визначення факторів за його номером, отриманим під час розрахунку кореляції. Розглянемо детальніше. Середні значення мають непарні номери. Відхилення - парні. Використовуємо перші 4 номери:

1. Середнє по горизонталі для 1-ї гістограми ($n=2$).
 2. Відхилення по горизонталі для 1-ї гістограми ($n=2$).
 3. Середнє по вертикалі для 2-ї гістограми ($n=2$).
 4. Відхилення по вертикалі для 2-ї гістограми ($n=2$).
- Для встановлення закономірності подання номерів:
5. Середнє по горизонталі для 3-ї гістограми ($n=3$).
 6. Відхилення по горизонталі для 3-ї гістограми ($n=3$).
 7. Середнє по вертикалі для 4-ї гістограми ($n=3$).
 8. Відхилення по вертикалі для 4-ї гістограми ($n=3$).

І так далі до 36.

Знаходимо опис фактору, написаний у результатах з кореляції. Для цього треба зробити розрахунок. Можна це зробити програмним шляхом. Такий розрахунок рекомендується проводити таким чином.



Нехай номер аргументу 15. Ділимо націло на 4. Отримуємо 3. Значить $n=3+2=5$. Номер гістограми для аргументу 12 дорівнює 6. Тоді номер гістограми, або 7, або 8. Уточнюємо, написавши:

13. Середнє по горизонталі для 7-ї гістограми ($n=5$).

14. Відхилення по горизонталі для 7-ї гістограми ($n=5$).

15. Середнє по вертикалі для 8-ї гістограми ($n=5$).

16. Відхилення по вертикалі для 8-ї гістограми ($n=5$).

Аргумент 15 це середнє по вертикалі для 8-ї гістограми ($n=5$);

15 – це середнє значення, тому що 15 – непарне число.

Якщо подивитися на коефіцієнт кореляції від кожного аргументу, то вони дуже малі порівняно з розрахунком за великих n . Але обрані комп'ютером сукупності з 4 чинників дають хоч і не дуже гарний, але помітний зв'язок із твердістю.

Надалі доведеться перевірити, що дасть, наприклад, метод (15), або інші для підвищення коефіцієнта кореляції.

А поки зроблено розрахунки кореляції з об'єднаним числом факторів: 34 за великих n і 36 за малих n (разом 70).

Попри те, що результати розрахунків свідчать про явну залежність твердості від узагальнених кольорів, отримали велику різницю в коефіцієнтах кореляції.

Рисунки ілюструють гістограми абсолютної величини різниць за $n=5$ між узагальненими середніми показниками з коефіцієнтами підсумовування (9) за методом (4) і (19). Різниця обчислювалася з точністю до 1, і вона не могла бути більшою за 15, бо розрахунок проводили для 16 кольорів. Насправді виявилось, що гістограма описуваних різниць не перевищувала 7.

Порівняльно наведено рисунки, які відображають вихідну структуру і являють собою гістограми різниць. При цьому на кожному рисунку відображено показники перших двох рядків за $n=5$, а третього і четвертого за $n=10$.

Нумерація рисунків зверху вниз, зліва направо. Рисунок 3 номер 1 – вихідна фотографія. Кольори у відтінках синього кольору. Тобто колір 0 – чорний, колір 255 – синій. Або в 16 кольорах: 1 – чорний, 16 – синій.

На решті рисунків на екран виводяться точки, в яких різниця між методом підсумовування (4) і (19) дорівнює, або 0 (рис. 3 позначення 2), або 1 (рис. 3 позначення 3), або 2 (рис. 3 позначення 4), або 3 (рис. 3 позначення 5), або 4 (рис. 3 позначення 6), або 5 (рис. 3 позначення 7), або 6 (рис. 3 позначення 8), або 7 (рис. 3 позначення 9). Відповідно для різниць за $n=10$, це якраз під рисунками різниць за $n=5$, будуть рис. 3 позначення 12-18. З наведених рисунків видно, що найбільше точок припадає на нульову різницю між методами (4) і (19).



Висновки. У проведених дослідженнях, формули (4) і (19) розглядали як перетворення одного кольору в інший. Але формула (5) від написаних перетворень вимагає пояснення. Виявилося, що (4) і (5), розглянуті спільно, є послідовним перетворенням одного кольору в інший, тобто, враховують попередні стани кольорів. Це не суперечить тому, що такі перетворення можуть бути пов'язані з автоколиваннями. Запропоновано програму розрахунку узагальнених кольорів.

Список використаних джерел

1. Hahn M., Wallmersperger T., Kroplin B.-H. Discrete element representation of discontinua: proof of concept and determination of material parameters. *Comp. Mat. Sci.* 2010. Vol. 50. P. 391-402.
2. Psakhie S. G., Shilko E. V., Smolin A. Yu. [et al.] Approach to simulation of deformation and fracture of hierarchically organized heterogeneous media, including contrast media. *Phys. Mesomech.* 2011, Vol. 14, no. 5-6. P. 224-248.
3. Zavsek S., Dimaki A. V., Dmitriev A. I., Shilko E. V., Pezdic J., Psakhie S. G. Hybrid Cellular Automata Method. Application to Research on Mechanical Response of Contrast Media. *Phys. Mesomech.* 2013. Vol. 1. P. 42-51.
4. Psakhie S. G., Shilko E. V., Grigoriev A. S., Astafurov S. V., Dimaki A. V., Smolin A. Yu. A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element-based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic–plastic materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014 (in press).
5. Psakhie S., Shilko E., Smolin A. [et al.] Development of a formalism of movable cellular automaton method for numerical modeling of fracture of heterogeneous elastic-plastic materials. *Fracture and Structural Integrity.* 2013. Vol. 24. P. 59-91.
6. Han Y., Cundall P. A. Lattice Boltzmann modeling of pore-scale fluid flow through idealized porous media. *Int. J. Numer. Meth. Fluids.* 2011. Vol. 67. P. 1720-1734.
7. Zhao G. F., Khalili N. A Lattice Spring Model for Coupled Fluid Flow and Deformation Problems in Geomechanics. *Rock Mech. and Rock Eng.* 2012. Vol. 45. P. 781-799.
8. Cook B. K., Noble D. R. A direct simulation method for particlefluid systems. *Eng. Comp.* 2011. Vol. 21, no. 2/3/4. P. 151-168.
9. Rieth M. Nano-engineering in science and technology: An Introduction to the World of Nano-Design. Singapore: World Scientific, 2003. 164 p.
10. Munjiza A. A., Knight E. E., Rougier E. Computational mechanics of discontinua. Chichester: Wiley, 2012. 276 p.



11. Рибалко І. М. Математичне моделювання структуроутворення при наплавленні відновлювальних покриттів з використанням модифікуючої домішки бентонітової глини. *Математичне моделювання*. 2021. № 1(44) С. 113–122. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(44\)2021.236032](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(44)2021.236032).
12. T. Skoblo, I. Rybalko, A. Saychuk, A. Tihonov. Improving The Quality and Durability of Restorative Coatings by Arc Deposition and Modification with Natural Additive Bentonite Clay. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2021. Vol. 9, No. 6. P. 643–650. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/06962021>.
13. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L., Sidashenko A. I., New Approaches in Study of Inhomogeneity of Heterogeneous Structures. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40, No. 2. P. 255–280. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0255>.
14. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехместрук Р. Ю. Комп'ютерна графіка: електронний навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2023. 147 с.
15. Погоруй А. О., Чемерис О. А. Вступ до теорії випадкових процесів : навч. посібник. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2020. 70 с.
16. Klein Rolf, Concrete and Abstract Voronoi Diagrams. *Lecture Notes in Computer Science*. 1989. 169 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-52055-4>.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2024 р.

M. Rybalko¹, A. V. Zakharov¹, O. V. Tikhonov¹,
S. A. Knyazev², G. O. Knyazeva²

¹ State Biotechnological University

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

STUDY OF METHODS OF OPTICAL AND MATHEMATICAL MODELLING OF THE MICROSTRUCTURE OF METALS AND ALLOYS

Summary

In this paper, the methods of generalised summation and colour sequences on photographs of structures are considered. It is shown that these methods are closely related to the description of structure hardness and other characteristics. The effectiveness of the proposed method lies in the fact that in a huge number of physical processes the effect of self-oscillations takes place. Self-oscillations occur only in feedback processes. They can be both periodic and non-periodic. Feedback is when the state of a system is affected not only by external factors (for structures, these are mostly thermal), but also by the initial internal state of the system associated with energy dissipation. The main focus is on the study of methods for generalised summation and transformation of colour sequences in images of structures, which aims to describe important physical properties, such as material hardness and wear resistance.



The methods used in this work are closely related to the effects of self-oscillations, which are phenomena that occur in feedback processes. This approach allows us to consider the internal states of the system and the influence of external factors, such as temperature, on the structural changes of the material. The research has shown that self-oscillations can be both periodic and non-periodic, which is key in analysing the structure of metals and alloys.

One of the central parts of the work is the mathematical description of colour transformations, in particular, formulas (4), (5) and (19). It is demonstrated that the colour transformation is closely related to the previous states of colours, which corresponds to the nature of self-oscillations. The paper demonstrates how the previous states of the structure affect its further changes.

The proposed programme for calculating generalised colours is an important tool for further studies of the microstructure of materials. The use of such methods can greatly simplify and automate the analysis of materials, which is especially important for high-precision research in the fields of materials science and metallurgy.

Key words: modelling, histograms, optical and mathematical description, microstructure, structure formation, materials science.