

*О.О. ВОДКА, М.І. ШАПОВАЛОВА, Л.В. РОЗОВА, В.І. ГРІЦКОВА, А.С. КОРЖ, Н.О. МІТЯСОВ,
О.С. СЕМЕНЕНКО, К.Ю. СКРИННИК, Ю.В. ЧЕПЕЛА*

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ МІКРОСТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ МЕТОДОМ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

Мікроструктури, як організація та розташування матеріалів на мікроскопічному рівні, мають суттєвий вплив на властивості та поведінку матеріалів, тому відіграють важливу роль для багатьох наукових і технічних галузях. Важливість синтезу внутрішньої структури полягає в можливості аналізу та вивчення взаємодії між елементами матеріалу, а також визначення оптимальних параметрів для досягнення бажаних властивостей. Дослідження та відтворення мікроструктур сприяють розробці нових матеріалів з унікальними властивостями в різних галузях, включаючи електроніку, авіацію, медицину та енергетику. Одним із ключових напрямків розвитку технології є візуалізація мікроструктур, яка дозволяє перетворити складні дані про внутрішню будову на зрозумілі візуальні моделі, спрощуючи аналіз та інтерпретацію. У роботі описано інформаційну систему «MaterialViz», яка дозволяє детально вивчати структуру матеріалу. Вона включає зручний інструментарій для аналізу та дослідження структурних характеристик матеріалів, а також можливість тривимірної візуалізації даних, що покращує розуміння структури та взаємодії його елементів. Користувачам надається можливість збереження та завантаження результатів досліджень, що сприяє зручності роботи та співпраці з іншими дослідниками. Використання додатку можливе в різних галузях, включаючи матеріалознавство, металургію, енергетику, електроніку та біомедицину, допомагаючи дослідникам оптимізувати та розробляти нові матеріали з покращеними характеристиками. Загалом, комп'ютерний застосунок «MaterialViz», є потужним інструментом для аналізу та вивчення структури матеріалів, що допомагає здійснювати глибокий аналіз та отримувати цінні візуальні висновки. Розроблена інформаційна система, призначена для комп'ютерного моделювання мікроструктур матеріалу за допомогою ряду методів імовірнісних клітинних автоматів. Реалізовані чотири типи алгоритми росту кристалів, що вирішує поставлені завдання та відповідає всім вимогам.

Ключові слова: мікроструктура, клітинний автомат, штучна генерація, візуалізація даних, OpenGL, C++.

Microstructures, as the organization and arrangement of materials at the microscopic level, have a significant impact on the properties and behavior of materials, thus playing a crucial role in various scientific and technical fields. The importance of synthesizing internal structures lies in the ability to analyze and study the interactions between material elements and determine optimal parameters to achieve desired properties. Researching and replicating microstructures contribute to the development of new materials with unique characteristics in diverse fields, including electronics, aviation, medicine, and energy. One of the key directions in technological advancement is microstructure visualization, which transforms complex data about internal structures into understandable visual models, simplifying analysis and interpretation. The work describes the information system "MaterialViz," enabling a detailed study of material structure. It includes a convenient toolkit for analyzing and investigating structural characteristics of materials, as well as the capability of three-dimensional data visualization, enhancing the understanding of the structure and interactions of its elements. Users are provided with the ability to save and load research results, promoting ease of work and collaboration with other researchers. The application of this system is possible in various domains, such as materials science, metallurgy, energy, electronics, and biomedicine, assisting researchers in optimizing and developing new materials with improved characteristics. Overall, the computer application "MaterialViz" is a powerful tool for analyzing and studying material structures, facilitating in-depth analysis, and obtaining valuable visual insights. The developed information system is intended for computer modeling of material microstructures using a range of probabilistic cellular automaton methods. Four types of crystal growth algorithms have been implemented, addressing set tasks and meeting all requirements.

Keywords: Microstructure, cellular automaton, artificial generation, data visualization, OpenGL, C++.

Вступ. Генерація мікроструктур є актуальним і важливим аспектом в багатьох галузях науки та техніки. Мікроструктури визначаються як організація та розташування матеріалів на мікроскопічному рівні, і вони суттєво впливають на властивості та поведінку матеріалів. Синтез внутрішньої структури є важливим процесом, оскільки дозволяє вивчати та аналізувати взаємодію між елементами матеріалу, їх розташування та властивості. Це допомагає визначити оптимальні умови для досягнення бажаних параметрів матеріалу, таких як міцність, стійкість до зношування, теплопровідність та ін.

Аналіз існуючих шляхів рішення проблеми.

Дослідження та відтворення мікроструктур сприяє розробці нових матеріалів з унікальними властивостями для різних галузей, включаючи електроніку, авіацію, медицину, енергетику. Один із ключових напрямків перспективного розвитку технології генерації мікроструктур - їх візуалізація. Додатки для візуалізації мікроструктур дозволяють перетворити складні дані про внутрішню будову на зрозумілий візуальний моделі, що спрощує аналіз та

інтерпретацію. Візуалізація мікроструктур дозволяє дослідникам та інженерам детально вивчати структуру матеріалу, виявляти зв'язки та взаємодії між його компонентами.

Слід відзначити програмні інструменти і системи, які призначені для генерації [8], обробки, аналізу та візуалізації мікроструктури матеріалів, як MicroStructPy [1], що дозволяє створювати якісні неструктуровані сітки шляхом використання геометрії зерна та мозаїки Лагерра; ImageSP [2], розроблена спільно компаніями SYSPROG та TRS, призначена для роботи з електронними та світловими мікроскопами; Naper [3] авторів Кві Р. та ін., що для побудови великомасштабних тривимірних випадкових полікристалів використовує інструмент Вороного [4–6, 14], розроблений авторами алгоритм для генерації статистично-еквівалентних структур окремих типів матеріалу [9-13]. Останні роки принесли значний вклад у розуміння та моделювання мікроструктур матеріалів. Серед відомих додатків слід відмітити: Material Studio, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics.

Використання математичних методів обробки даних значно знижує негативний вплив людського

фактору, зменшує час дослідження і підвищує точність та достовірність результатів в аналізі автоматизованих інтелектуальних систем прийняття рішень. Ці системи дозволяють автоматизувати контрольний процес і пов'язувати властивості матеріалу з його мікроструктурою. Для аналізу мікроструктури матеріалу можна використовувати гібридні методи, які поєднують чисельні та експериментальні дослідження, а також комп'ютерне моделювання [7]. Крім того, візуалізація мікроструктур є важливим інструментом для відображення результатів наукових досліджень та передачі цієї інформації іншим спеціалістам з різних галузей.

Однак, слід зазначити, що формування мікроструктур є складною, багатфакторною проблемою, на яку впливають: хімічний склад, температура, тиск, швидкість охолодження та багато іншого. Також, мікроструктури можуть бути надзвичайно різноманітними залежно від типу матеріалу, кількості домішок, технології та умов виготовлення.

Таким чином, незважаючи на значний прогрес у генерації мікроструктур та розробці відповідних додатків, ця тема потребує подальших досліджень та розвитку. Є потенціал для вдосконалення алгоритмів генерації, розширення функціональності програм та покращення точності візуалізації мікроструктур.

Постановка задачі. Мета проекту полягає у створенні додатку, який здатний генерувати мікроструктуру конкретного матеріалу з використанням обраного алгоритму. Генерована

мікроструктура буде представлена у вигляді куба, для якого користувач матиме можливість вказувати кількість початкових точок та довжину ребра. Додаток також повинен надавати користувачу можливість маніпулювати кубом.

Постановка проблеми. Для досягнення мети роботи, були поставлені наступні завдання та цілі проекту:

- Розробити інформаційну систему, яка забезпечує аналіз та вивчення структури матеріалу. Вибір відповідного алгоритму для аналізу структури матеріалу є обов'язковим етапом роботи. Додаток має надавати можливість детального вивчення структури матеріалу шляхом використання візуалізації, що сприяє поглибленому розумінню взаємодії та функціональності його елементів. Більш того, додаток повинен надавати зручні механізми для виокремлення елементів та їх яскравої візуальної ідентифікації.

- Забезпечення зручного та ефективного використання розробленого комп'ютерного додатку також є однією з головних цілей проекту. Необхідно реалізувати можливість збереження результатів та зображень у документі та їх завантаження, з метою забезпечення зручності роботи дослідників та інженерів з отриманими результатами. Важливою особливістю розробленої системи повинна стати тривимірна візуалізація даних, що дає можливість отримати більш докладний огляд структури матеріалу та його взаємозв'язків. Користувачам буде надана можливість збільшення та обертання куба матеріалу, що сприятиме деталізації та підвищенню точності аналізу.



Рис. 1 – Окіл фон Неймана

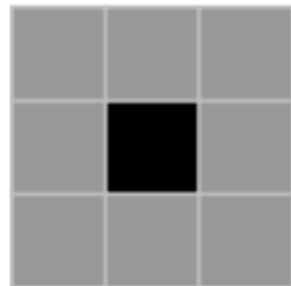


Рис. 2 – Окіл Мура

0.543	0.970	0.543
0.970	1.000	0.970
0.543	0.970	0.544

Рис. 3 – «Імовірнісний круг»

0.016	0.501	0.448
0.501	1.000	0.501
0.448	0.501	0.016

Рис. 4. – «Імовірнісний еліпс»

Теорія розробки програмного забезпечення.

В усіх наступних описах роботи клітинних автоматів використовується тривимірна сітка.

1). Клітинний автомат фон Неймана [14], що представляє концепцію самовідтворювальної машини, яка ґрунтується на простих правилах взаємодії між окремими елементами (клітинами) у просторі (Рис. 1). Кожна клітина, за винятком крайових, має шість сусідів, які визначаються лише тими клітинами, що мають спільну сторону з даною клітиною, і майбутній

стан цієї клітини залежить від стану самої клітини та станів її сусідів. Приклад заповнення (1):

2). Клітинний автомат Мура [14]. Цей тип клітинного автомата є одним із найпоширеніших і досліджуваних у сфері вивчення складних систем і

$$\begin{aligned}
 y'[k][i][j] &= f(y[k][i][j], \\
 &y[k+1][i][j], y[k][i+1][j], \\
 &y[k][i][j-1], y[k][i][j+1], \\
 &y[k][i-1][j], y[k-1][i][j]).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

штучного росту. Принцип роботи полягає у тому, що у клітинному автоматі Мура (Рис. 2), кожна клітина (крім крайових) має 26 сусідів, і це обумовлено зв'язком зерна (вихідної клітини), якщо вони мають спільну сторону або вершину. Майбутній стан самої клітини залежить від стану зерна та станів її сусідів (2):

$$\begin{aligned}
 & y'[k][i][j] = f(y[k][i][j], \\
 & y[k+1][i][j], y[k+1][i][j-1], \\
 & y[k+1][i][j+1], y[k+1][i+1][j], \\
 & y[k+1][i+1][j-1], y[k+1][i+1][j+1], \\
 & y[k+1][i-1][j], y[k+1][i-1][j-1], \\
 & y[k+1][i-1][j+1], y[k][i][j], \\
 & y[k][i][j-1], y[k][i][j+1], \\
 & y[k][i+1][j], y[k][i+1][j-1], \\
 & y[k][i+1][j+1], y[k][i-1][j], \\
 & y[k][i-1][j-1], y[k][i-1][j+1], \\
 & y[k-1][i][j], y[k-1][i][j-1], \\
 & y[k-1][i][j+1], y[k-1][i+1][j], \\
 & y[k-1][i+1][j-1], y[k-1][i+1][j+1], \\
 & y[k-1][i-1][j], y[k-1][i-1][j-1], \\
 & y[k-1][i-1][j+1]).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

3). Клітинний автомат – «Імовірнісний круг», як модифікація класичного клітинного автомата, в якому введені випадкові або ймовірнісні елементи [14]. У принципі роботи імовірнісного клітинного автомата кількість сусідів зерна (вихідної клітини) та принцип

сусідства аналогічні клітинному автоматі Мура. Але відмінність полягає в тому, що кожному сусіду надається вірогідність його заповнення (Рис. 3).

4). Клітинний автомат – «Імовірнісний еліпс» [14], як модифікація кліткового автомату «Імовірнісний круг», що полягає у відмінності ймовірностей сусідів зерна вихідної клітини (Рис. 4).

4. Практична реалізація програмного забезпечення. Розроблена програма для штучної генерації мікроструктури у формі репрезентативного тривимірного куба з використанням різних методів клітинних автоматів, забезпечує користувача зручними інструментами для управління процесом створення, візуалізації та збереження отриманих даних. Діаграма варіантів використання інформаційної системи представлена на Рис. 5. Програма забезпечує користувача засобами для управління візуалізацією процесу синтезу досліджуваного об'єму. Користувач може ввести розміри куба і кількість початкових точок, що будуть використовуватися для створення куба.

У додатку закладена можливість обрати один із чотирьох доступних алгоритмів генерації росту кліткових автоматів (Рис. 6-9). Ці алгоритми відрізняються своєю методологією та особливостями функціонування, що надає користувачеві можливість експериментувати та вибрати оптимальний залежно від власних потреб. Крім того, програма дозволяє користувачу «розсунути» куб, розбивши його на окремі секції (Рис. 10). Така функція розподіляє об'єм на незалежні частини, спрощуючи огляд та аналіз окремих сегментів. Після завершення процесу генерації, користувач може переглянути отримані результати та зберегти їх у окремий файл для подальшого використання, аналізу або обміну між іншими системами та дослідниками.

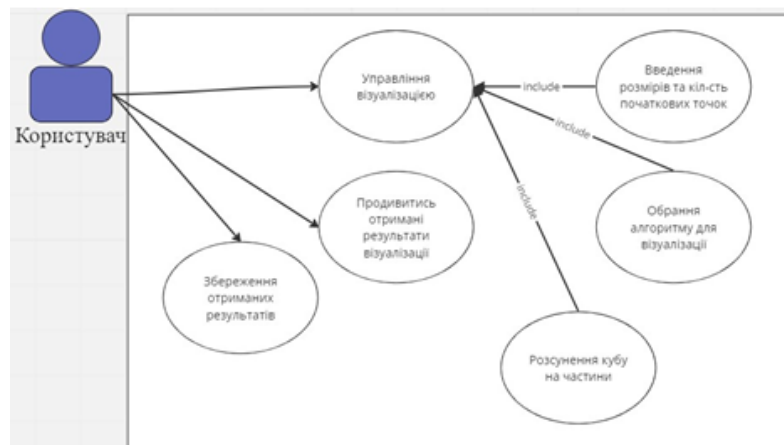


Рис. 5 – UML-діаграма прецедентів інформаційної системи

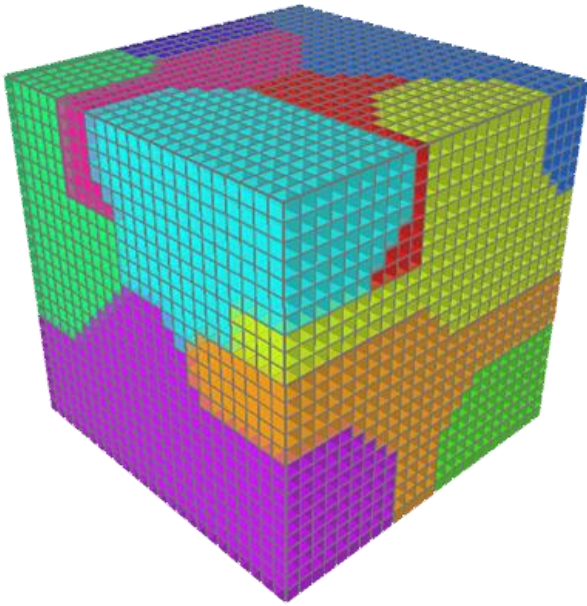


Рис. 6 – Алгоритм Неймана

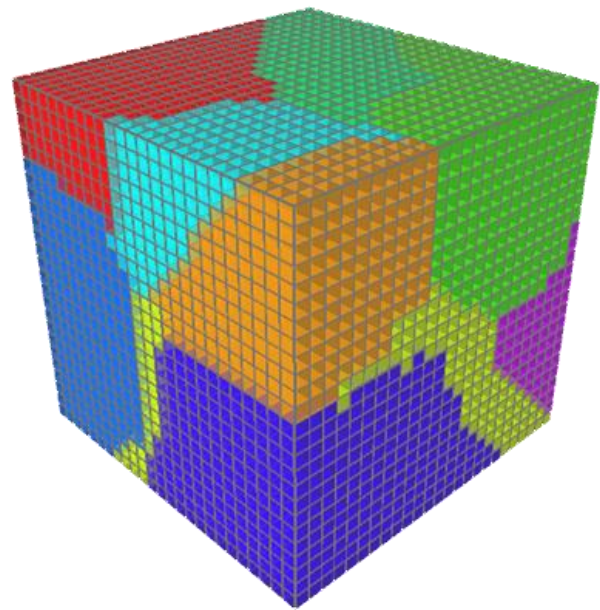


Рис. 7 – Алгоритм «Імовірнісний круг»

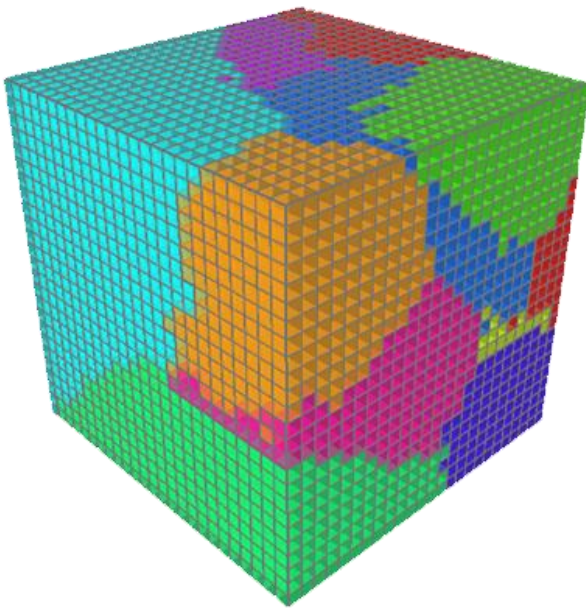


Рис. 8 – Алгоритм «Імовірнісний еліпс»

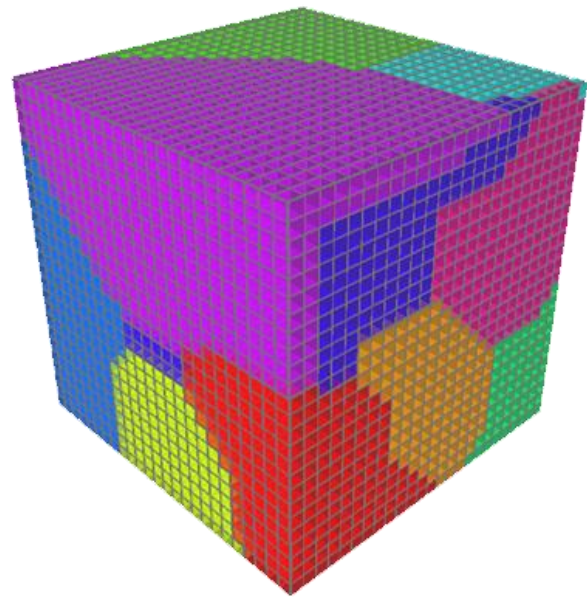


Рис. 9 – Алгоритм Мура

У розробці проекту використовувалися такі технічні засоби: Qt Creator, C++ та OpenGL, які допомогли створити потужний та функціональний додаток з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та високоякісною візуалізацією. Для розробки інтерфейсу використані інструменти Figma та плагін Easometric. Приклад розробленого інтерфейсу зображено на Рис. 11.

Основний клас MyGLWidget, що представляє віджет OpenGL, наведено на діаграмі (Рис. 12). Він містить функції-члени та слоти для обробки візуалізації OpenGL і взаємодії з користувачем. Серед змінних класу виділяють:

- xRot, yRot, zRot – ціле число, що представляє кут повороту навколо осі x, y та z відповідно;

- distance: плавне значення, що позначає відстань камери від сцени;
- lastPos: об'єкт QPoint, що представляє останню позицію миші;
- m_projection: об'єкт QMatrix4x4, що представляє матрицю проєкції;
- numCubes_: ціле число, що представляє кількість кубів;
- numColors_: ціле число, що представляє кількість кольорів;
- distanceFactor: величина, що представляє коефіцієнт відстані.

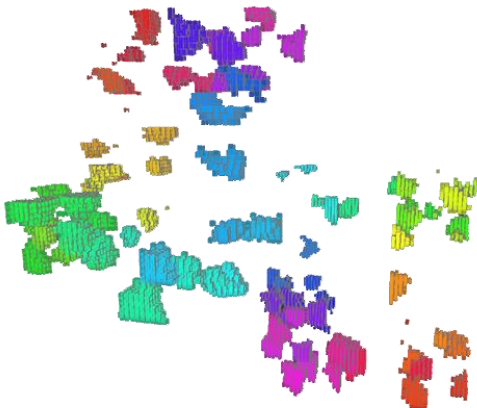


Рис. 10 – Куб в розсуненому вигляді

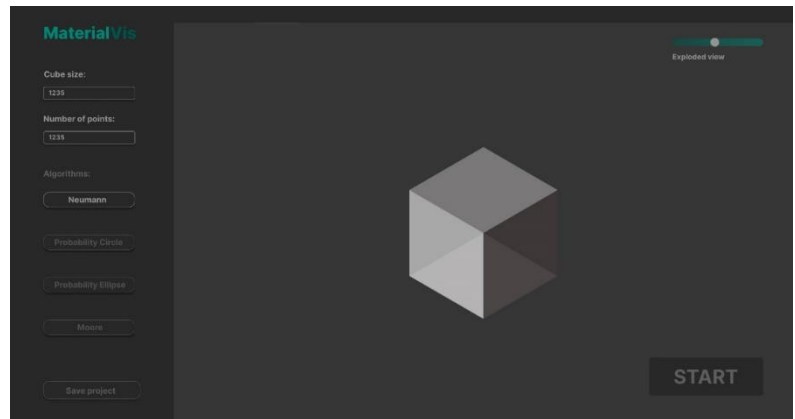


Рис. 11 – Приклад розробленого інтерфейсу додатку «MaterialViz»

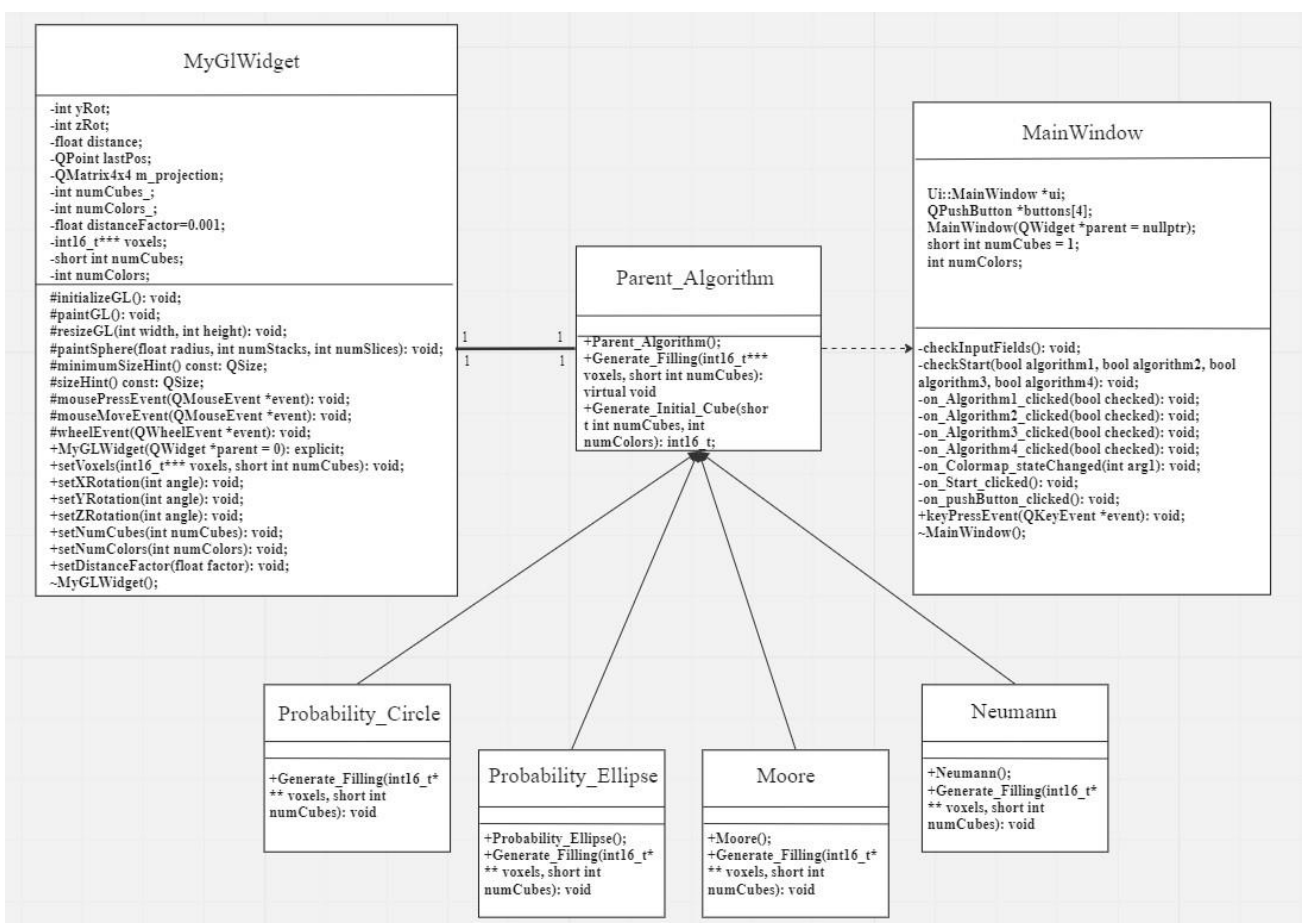


Рис. 12– UML-діаграма класів додатку «MaterialViz»

Розроблений клас `MyGLWidget` дозволяє оброблювати події натискання, переміщення курсору миші по площині віджита та натискання на коліщатко у межах вікна. Це дозволяє реалізувати індивідуально настроювану поведінку, наприклад, відстеження координат миші або ініціювання маніпуляцій з об'єктами. Реалізовує інтерактивні функції обертання, масштабування або переміщення об'єктів залежно від потреб користувача.

Використання додатку для генерації мікроструктур має потенціал для застосування у різних галузях діяльності з метою дослідження та аналізу матеріалів. Заснований на наукових принципах і алгоритмічних методах, цей інструмент може візуалізувати складну мікроструктуру матеріалів на мікрорівні. У сфері матеріалознавства та металургії програму можна використовувати для вивчення властивостей різних сплавів та їх поведінки. Додаток дозволяє дослідникам генерувати мікроструктури

змінюючи параметри, такі як кількість частинок та розмір куба, що дозволяє вивчати вплив структури на механічні, теплові та електричні властивості матеріалів. Також програму можна використовувати для оптимізації процесів формування та обробки матеріалів у галузі матеріалознавства, а також для моделювання тканин та біоматеріалів у біомедицині. У галузях енергетики, електроніки та інших технологій додаток може використовуватися для вивчення впливу мікроструктур на провідність, оптичні та електронні властивості матеріалів, сприяючи розробці нових матеріалів для сонячних батарей, електроніки високої щільності та інших сучасних технологій. Загалом, програма для генерації мікроструктур відкриває широкі можливості для дослідження, аналізу та оптимізації матеріалів у різних галузях, сприяючи розвитку нових матеріалів з покращеними характеристиками та високою продуктивністю.

Висновки. У ході роботи було досягнуто кілька важливих результатів, серед яких варто відзначити:

- розроблено комп'ютерний застосунок «MaterialViz», який відкриває можливість вивчення структури матеріалу. Цей застосунок надає користувачам зручний інструментарій для аналізу і дослідження структурних характеристик матеріалів. Дозволяє проводити аналіз структури матеріалу, використовуючи низку запропонованих алгоритмів синтезу матеріалу;

- додана функціональність детального оглядати структуру матеріалу за допомогою візуалізації. Цей інструмент дозволяє отримати візуальне представлення структурних елементів матеріалу та їх взаємодії. Візуалізація даних у тривимірному форматі – сприяє кращому розумінню структури матеріалу, а можливість наближення, повороту та розділення досліджуваного об'єкту на складові компоненти – дозволяє користувачам отримати більш детальний огляд його структури та взаємозв'язків. Цей функціонал допомагає виявляти та досліджувати дрібні деталі та особливості внутрішньої структури матеріалу;

- реалізована можливість збереження зображень у документі та їх подальшого завантаження, що дозволяє користувачам зберігати результати своїх досліджень, аналізувати їх у подальшому, та ділитись наробком із іншими дослідниками;

Усі ці досягнення роблять комп'ютерний застосунок потужним інструментом для аналізу, дослідження і вивчення структури матеріалів. Вони надають зручність, гнучкість і високу якість візуалізації, що допомагає користувачам здійснювати глибокий аналіз та отримувати цінні візуальні висновки.

Список літератури

1. Hart K. A., Rimoli J. J. *MicroStructPy: A statistical microstructure mesh generator in Python*. SoftwareX. 2020. Vol. 12. P. 100595.

2. *ImageSP-software system for electron and light microscopy*. URL: <https://sys-prog.com/wp-content/uploads/ImageSP-booklet-eng.pdf/> (дата звернення: 05.07.2023).

3. Quey R., Dawson P. R., Barbe F. *Large-scale 3D random polycrystals for the finite element method: generation, meshing and remeshing*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2011. Vol. 200, No. 17–20. P. 1729–1745.

4. Geuzaine C., Remacle J. F. *Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. Vol. 79, No. 11. P. 1309–1331.

5. Fritzen F., Böhlke T., Schnack E. *Periodic three-dimensional mesh generation for crystalline aggregates based on Voronoi tessellations*. Computational Mechanics. 2009. Vol. 43, No. 5. P. 701–713.

6. Carlsson J., Isaksson P. *A statistical geometry approach to length scales in phase field modelling of fracture and strength of porous microstructures*. International Journal of Solids and Structures. 2020. Vol. 200–201. P. 83–93.

7. Altenbach H. *Numerical and experimental investigations of ductile steels including damage*. Mechanical Behaviour of Materials VI. Elsevier. 1992. P. 69–74.

8. Шаповалова М. І., Водка О. О. *Комп'ютерні методи побудови параметричних статистично еквівалентних моделей мікроструктури високоміцного чавуну для аналізу його пружних характеристик*. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 6, № 1. С. 179–187.

9. Shapovalova M., Vodka O. *A data-driven approach to the prediction of spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics*. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham. 2021. P. 565–576.

10. Shapovalova M., Vodka O. *Application of data-driven yield surface to prediction of failure probability for centrifugal pump*. In: Altenbach H., Amabili M., Mikhlin Y.V. (eds) *Nonlinear Mechanics of Complex Structures*. Advanced Structured Materials, Springer, Cham. 2021. Vol. 157. P. 295–309.

11. Shapovalova M., Vodka O. *Computer method of determining the yield surface of variable structure of heterogeneous materials based on the statistical evaluation of their elastic characteristics*. In: Chaari F., Leskow J., Wylomanska A., Zimroz R., Napolitano A. (eds) *Nonstationary Systems: Theory and Applications*. WNSTA 2021. Applied Condition Monitoring, Springer, Cham. 2022. Vol. 18. P. 378–392.

12. Шаповалова М. І., Водка О. О. *Дворівневі математичні моделі визначення напруженого стану та ресурсу пластини з отвором*. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 1. С. 55–60.

13. Shapovalova M., Vodka O. *Image processing technology to determine the parameters of the internal structure of composite materials*. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, 2021, September 13 – 17. P. 539–543. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570099>

14. Водка О., Панаріна О. *Розробка методів комп'ютерного синтезу та аналізу характеристик матеріалів неоднорідної структури*. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. 2018. Т. 29, № 6. С. 122–126.

References (transliterated)

1. Hart K. A., Rimoli J. J. *MicroStructPy: A statistical microstructure mesh generator in Python*. SoftwareX. 2020. Vol. 12. P. 100595.

2. *ImageSP-software system for electron and light microscopy*. URL: <https://sys-prog.com/wp-content/uploads/ImageSP-booklet-eng.pdf/> (дата звернення: 05.07.2023).

3. Quey R., Dawson P. R., Barbe F. *Large-scale 3D random polycrystals for the finite element method: generation, meshing and remeshing*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2011. Vol. 200, No. 17–20. P. 1729–1745.

4. Geuzaine C., Remacle J. F. *Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. Vol. 79, No. 11. P. 1309–1331.

5. Fritzen F., Böhlke T., Schnack E. *Periodic three-dimensional mesh generation for crystalline aggregates based on Voronoi*

tessellations. Computational Mechanics. 2009. Vol. 43, No. 5. P. 701–713.

6. Carlsson J., Isaksson P. A statistical geometry approach to length scales in phase field modelling of fracture and strength of porous microstructures. International Journal of Solids and Structures. 2020. Vol. 200–201. P. 83–93.

7. Altenbach H. Numerical and experimental investigations of ductile steels including damage. Mechanical Behaviour of Materials VI. Elsevier. 1992. P. 69–74.

8. Shapovalova M. I., Vodka O. O. *Komp'yuterni metodi pobudovi parametrichnih statistichno ekvivalentnih modelej mikrostrukturi visokomicnogo chavunu dlya analizu jogo pruzhnikh harakteristik: Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Tehnichni nauki.* 2019. Vol. 6, No. 1. P. 179–187.

9. Shapovalova M., Vodka O. A data-driven approach to the prediction of spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham. 2021. P. 565–576.

10. Shapovalova M., Vodka O. Application of data-driven yield surface to prediction of failure probability for centrifugal pump. In: Altenbach H., Amabili M., Mikhlin Y.V. (eds) Nonlinear Mechanics of Complex Structures. Advanced Structured Materials, Springer, Cham. 2021. Vol. 157. P. 295–309.

11. Shapovalova M., Vodka O. Computer method of determining the yield surface of variable structure of heterogeneous materials based on the statistical evaluation of their elastic characteristics. In: Chaari F., Leskow J., Wylomanska A., Zimroz R., Napolitano A. (eds) Nonstationary Systems: Theory and Applications. WNSTA 2021. Applied Condition Monitoring, Springer, Cham. 2022. Vol. 18. P. 378–392.

12. Shapovalova M. I., Vodka O. O. *Komp'yuterni metodi pobudovi parametrichnih statistichno ekvivalentnih modelej mikrostrukturi visokomicnogo chavunu dlya analizu jogo pruzhnikh harakteristik: Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Tehnichni nauki.* 2019. Vol. 6, No. 1. P. 179–187.

13. Shapovalova M., Vodka O. Image processing technology to determine the parameters of the internal structure of composite materials. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, 2021, September 13 – 17. P. 539–543. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570099>

14. Vodka O., Panarina O. *Rozrobka metodiv kompiyuternoho syntezu ta analizu kharakterystyk materialiv neodnorodnoyi struktury. Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Tehnichni nauki.* 2018. Vol. 29, No. 6. P. 122–126.

Надійшла (received) 16.07.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Водка Олексій Олександрович (Vodka Oleksii Oleksandrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; тел.: (057) 707-68-79, +380 68 886 29 85; e-mail: oleksii.vodka@gmail.com, oleksii.vodka@kphi.edu.ua; ORCID: 0000-0002-4462-9869.

Шаповалова Марія Ігорівна (Shapovalova Mariia Ihorivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: MiShapovalova@gmail.com, mariia.shapovalova@kphi.edu.ua; ORCID: 0000-0002-4771-7485.

Розова Людмила Вікторівна (Rozova Lyudmila Viktorivna) – кандидат технічних наук (PhD), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: Lyudmyla.Rozova@kphi.edu.ua; ORCID: 0000-0002-0781-7473.

Грицькова Валерія Іванівна (Hriskyva Valeriia Ivanivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», бакалавр з прикладної математики; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: valeriia.hriskyva@infiz.kphi.edu.ua

Корж Анастасія Сергіївна (Korzh Anastasiia Serhiivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», бакалавр комп'ютерних наук; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: anastasia.korzh@infiz.kphi.edu.ua

Мітiasов Нікіта Олександрович (Mitiasov Nikita Oleksandrovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», бакалавр з прикладної математики; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: nikita.mitiasov@infiz.kphi.edu.ua

Семененко Олег Сергійович (Semenenko Oleh Serhiiovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», бакалавр з прикладної математики; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: oleh.semenenko@infiz.kphi.edu.ua

Скринник Катерина Юріївна (Skrynnik Kateryna Yuriivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», бакалавр комп'ютерних наук; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: kateryna.skrynnik@infiz.kphi.edu.ua

Чепела Юлія Володимирівна (Chepela Yuliia Volodymyrivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», бакалавр комп'ютерних наук; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: yuliia.chepela@infiz.kphi.edu.ua