

¹Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

²Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

Синергія штучного інтелекту та матеріалознавства при створенні зображень НаноАрт на основі структур металів та сплавів

В умовах цифрової трансформації та сталого розвитку відбувається синергія штучного інтелекту та матеріалознавства. Зокрема, у контексті Індустрії 4.0 науковці за спеціальностями G8 «Матеріалознавство» та G10 «Металургія» фокусуються на впровадженні цифрових технологій для створення «розумних» матеріалів, моделювання властивостей та структури матеріалів, автоматизації виробничих процесів, створенні цифрових двійників та інше. У роботі акцентується увага на використанні штучного інтелекту (ШІ) для покращення якості мікрофрактографій структур металів та сплавів (видалення подряпин й пилу, підвищення різкості, контрасту, деталізації зерен та інше) з подальшим створенням зображень НаноАрт у вигляді пейзажів, тварин, предметів та іншого. В якості інструментів штучного інтелекту при створенні зображень НаноАрт представляється можливим використання як спеціалізованого наукового програмного забезпечення (MountainsMap, Gwyddion, ImageJ/Fiji), так і графічних редакторів з підтримкою штучного інтелекту (Adobe Photoshop (з функцією Generative Fill), Affinity Photo, Luminar Neo), генеративних нейромереж (ChatGPT, Midjourney, Stable Diffusion, Adobe Firefly) та мобільних додатків (Prisma або Pikazo). В роботі також розглядаються питання застосування як різних інструментів штучного інтелекту, так і різних візуальних стилізацій зображення (наприклад, у стилі LEGO, порцеляновому стилі, 3D стилі, в'язаному стилі, стилі пазлів та інших), що в свою чергу дозволяє досліджувати різні форми, текстури, матеріали й візуальні ефекти і має важливе значення для створення зображень НаноАрт й креативних цифрових зображень. Особлива увага приділяється естетичному аспекту отриманих зображень НаноАрт: перетворення чорно-білого зображення структур металів і сплавів в різнокольорові картини демонструє красу мікросвіту, здатності бачити не лише функціональне, а й художнє призначення результатів своїх досліджень.

Ключові слова: матеріалознавство, цифровізація, цифрова металографія, структура металів і сплавів, штучний інтелект, інструменти штучного інтелекту, ChatGPT, НаноАрт, стилізація зображень.

Вступ. На сьогодні в контексті все більшої цифровізації та автоматизації виробничих процесів концепція Індустрії 4.0 постає як невід'ємна складова досягнення Цілей сталого розвитку до 2030 року. Необхідні координовані зусилля на глобальному та національному рівнях щодо забезпечення рівного доступу до цифрових технологій, розбудови відповідної інфраструктури та створення сприятливих умов для інновацій та розвитку промисловості [1]. Перехід до цифровізації матеріалознавства відкриває нові можливості для

прогнозування властивостей матеріалів, оптимізації їх складу й структури, а також скорочення часу між науковою ідеєю та її практичною реалізацією [2—4]. Цифрові технології, від штучного інтелекту до відкритих наукових платформ, дедалі активніше змінюють те, як ми досліджуємо матеріали. Сучасне матеріалознавство вже не уявити без симуляцій, алгоритмів прогнозування та доступу до глобальних баз даних [5].

Використання методів машинного навчання, зокрема глибинного навчання, пришвидшує проце-

си відкриття нових функціональних матеріалів за рахунок того, що дає змогу аналізувати величезні масиви експериментальних даних та результатів комп'ютерного моделювання, ідентифікувати приховані закономірності та встановлювати кореляції між складом, структурою та макроскопічними властивостями. Алгоритми машинного навчання успішно використовуються для прогнозування термодинамічної стабільності та механічних характеристик сплавів, а також для моделювання процесів синтезу та обробки матеріалів. Моделі глибокого навчання демонструють високу ефективність у розпізнаванні мікроструктур за зображеннями, отриманими за допомогою електронної мікроскопії, що сприяє автоматизації аналізу та контролю якості. Крім того, методи штучного інтелекту є незамінними для виявлення оптимальних умов кристалізації, що забезпечує спрямований дизайн матеріалів із заданими властивостями [6].

Більш детально сучасний огляд перспектив впливу машинного навчання, глибокого навчання та штучного інтелекту на матеріалознавство, технологічні процеси, проєктування конструкцій та механічних властивостей матеріалів представлено в роботах [7—13].

Безпосередньо поява високопродуктивних обчислювальних методів проєктування матеріалів призвела до створення безлічі баз даних матеріалів, таких як AFLOW, Materials Project (MP), MATDAT, MatWeb, MatMatch, MakeltForm та MatNavi. Ці бази даних містять величезну кількість властивостей матеріалів (сталей, алюмінієвих та титанових сплавів, композитів, нанопористих матеріалів та інших), отриманих з експериментальних вимірювань і розрахунків з перших принципів, включаючи механічні властивості, такі як постійна пружності, міцність на розтяг/згин/зсув/втому, тріщиностійкість, твердість і так далі [14].

У майбутньому за допомогою різноманітних інструментів штучного інтелекту стане можливим проєктування високоентропійних сплавів, високо-температурних суперсплавів, термоелектричних матеріалів, двомірних матеріалів, магнітокалоричних матеріалів, надпровідників, металевого скла, припоїв, чутливих композитних матеріалів, топологічних матеріалів та інше [15—26].

Постановка задачі. В умовах сьогодення штучний інтелект активно інтегрується в освітній процес: персоналізує навчання, забезпечує адаптивність та інтерактивність освіти [27—29]. Впровадження віртуальної, доповненої та змішаної реальності сприяє глибокому зануренню у навчальні матеріали. Це покращує засвоєння знань та розвиток практичних навичок, розвиток цифрової компетентності та креативного мислення, що дозволяє здобувачам освіти ефективно використовувати сучасні технології у професійній діяльності [30]. Під час освітнього процесу викладачі та здобувачі вищої освіти можуть використовувати наступні програми штучного інтелекту: GitHub Education for Teachers, GitHub Education for Students, GitHub Education for Schools, Azure for Students, AAWS Academy, WS Educate, Canva for

Education та інші [31].

Сучасний формат дистанційного навчання створює для здобувачів вищої освіти, що навчаються за спеціальностями G8 «Матеріалознавство» та G10 «Металургія», низку викликів, зокрема пов'язаних із самоорганізацією, мотивацією та технічним забезпеченням освітнього середовища. Здобувачі вищої освіти під впливом сучасних цифрових технологій стикаються з необхідністю формування та розвитку цифрових компетентностей. Інтерактивні технології дозволяють активізувати освітній процес, зробити його більш цікавим. Особливої уваги заслуговує креативність у навчанні, яка дозволяє формувати індивідуальні освітні траєкторії, підвищувати мотивацію до навчання та розвивати критичне мислення. Так, наприклад, поєднання мистецтва та матеріалознавства у вигляді зображень НаноАрт створює передумови для підвищення мотивації до вивчення матеріалознавства та глибокого розуміння наноструктур.

Метою роботи є дослідження можливостей використання штучного інтелекту в умовах цифровізації освітнього процесу, зокрема під час обробки та аналізу структур металів і сплавів, а також обґрунтування значущості створення зображень НаноАрт як засобу розвитку креативності навчання й наочної демонстрації потенціалу сучасних цифрових технологій у формуванні мікроскопічних арт-об'єктів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні науково-технічні **завдання**:

— проаналізувати можливості використання інструментів штучного інтелекту для обробки та аналізу структур металів і сплавів;

— дослідити особливості створення зображень НаноАрт за допомогою різних інструментів штучного інтелекту;

— оцінити освітній потенціал НаноАрт як інструменту розвитку креативності;

— надати рекомендації щодо етичного та раціонального використання ШІ при створенні зображень НаноАрт.

Об'єкт та методика дослідження. **Об'єктом дослідження** є процес використання штучного інтелекту в умовах цифровізації освітнього процесу під час аналізу мікроструктур металів і сплавів. **Предметом дослідження** є методи та можливості застосування інструментів штучного інтелекту для обробки, аналізу та візуалізації структур металів і сплавів, зокрема шляхом створення зображень НаноАрт.

У роботі використано загальнонаукові, педагогічні та прикладні методи дослідження, зокрема аналіз і синтез наукових джерел, педагогічне спостереження, комп'ютерну обробку зображень, інструменти штучного інтелекту та візуальний аналіз, що дало змогу комплексно дослідити можливості використання ШІ в освітньому процесі.

Матеріали та методика дослідження. Дослідження можливостей використання штучного інтелекту в умовах цифровізації освітнього процесу проводилося в кілька етапів:

— аналітичний етап, що передбачав аналіз і узагальнення наукових джерел з проблем цифровізації освітнього процесу, використання штучного інтелекту та креативного навчання;

— практичний етап, який включав цифрову обробку зображень мікроструктур металів і сплавів із застосуванням інструментів штучного інтелекту і безпосередньо процес створення зображень НаноАрт;

— педагогічний етап, спрямований на спостереження та аналіз впливу використання цифрових технологій і НаноАрт на навчальну мотивацію та креативність здобувачів вищої освіти;

— узагальнювальний етап, на якому здійснювався аналіз отриманих результатів і формулювання загальних висновків.

В роботі використовуються структури металів і сплавів з атласів структур металів та сплавів [32, 33]. Для створення зображень у стилі НаноАрт за допомогою графічних редакторів Paint 3D та Adobe Photoshop використовується методологія, описана в роботах [34, 35]. Для покращення якості мікрофрактографій структур металів та сплавів (зокрема, видалення подряпин й пилу, підвищення різкості, контрасту, деталізації зерен та інше) за допомогою ChatGPT 5.2 використовується методологія, описана в роботі [36].

У ролі інструментів штучного інтелекту при створенні зображень НаноАрт представляється можливим використання:

— спеціалізованого наукового програмного забезпечення (для «псевдозабарвлення»): MountainsMap, Gwyddion, ImageJ/Fiji;

— графічних редакторів з підтримкою штучного інтелекту: Adobe Photoshop (з функцією Generative Fill), Affinity Photo, Luminar Neo;

— генеративних нейромереж (для художньої стилізації): ChatGPT, Midjourney, Stable Diffusion, Adobe Firefly;

— мобільних додатків (для швидких експериментів): Prisma або Pikazo.

Для професійного створення зображення НаноАрт доцільно використовувати зв'язку: Gwyddion (підготовка рельєфу) → Topaz Photo AI (покращення чіткості) → Photoshop (художня обробка).

Результати дослідження. В роботі пропонується використання як різних інструментів штучного інтелекту, так і різних візуальних стилізацій, що застосовуються у цифровому мистецтві та генерації зображень засобами штучного інтелекту. При цьому вибір інструменту штучного інтелекту при створенні зображень НаноАрт залежить насамперед від поставленої мети та вимог до кінцевого результату. Вибір же візуальних стилізацій на кшталт LEGO, порцеляни, 3D, акварелі, глини, в'язаного арту, пазлів — це частина візуальних сьогоденних трендів, обумовлений стрімким розвитком цифрових технологій, доступністю інструментів генерації зображень, а також зростаючим попитом на естетику, що сприяє емоційній зрозумілості візуальних образів.

Зміна інструменту ШІ зумовлює варіативність візуального результату: одне й те саме зображення, виконане в межах однакової стилізації, набуває

різних візуальних характеристик. Це пояснюється відмінностями в архітектурі моделей, алгоритмах генерації та підходах до інтерпретації форми, текстури й кольору в різних AI-системах. Наприклад, такі інструменти ШІ, як ChatGPT (із функціями генерації зображень), Stable Diffusion, Midjourney, DALL·E, широко використовуються для створення НаноАрт та художньої візуалізації мікро- і наноструктур. Використання різних платформ ШІ дозволяє досліджувати широкий спектр художніх інтерпретацій наукових образів і підкреслює експериментальний характер поєднання ШІ, науки й дизайну.

Наприклад, беручи за основу мікроструктуру ливарного сплаву алюмінію (не модифікований силумін) (рис. 1а), за допомогою генеративної моделі штучного інтелекту ChatGPT 5.2 можна отримати різні візуальні стилізації зображення НаноАрт «Примула»: стиль LEGO (рис. 1в), в'язаний стиль (рис. 1д), порцеляновий стиль (рис. 1е), стиль пазлів (рис. 1ж), стилі 3D (рис. 1к), стилі акварель (рис. 1л) та стилі глини (рис. 1м) та інші. Варто зазначити, що НаноАрт «Примула» символізує оновлення, початок нового життя та пробудження, адже примула є однією з перших квіток, що з'являється після зими. У контексті НаноАрт вона уособлює крихкість і водночас стійкість життя на мікрорівні, гармонію природних форм і складних внутрішніх структур, а також надію на відродження, розвиток і безперервність життєвих процесів.

Отже, представлені в роботі візуальні стилізації зображення НаноАрт «Примула» передусім розкривають можливості поєднання наукової візуалізації з образною мовою сучасного дизайну, що сприяє популяризації нанотехнологій і формуванню зрозумілих візуальних наративів. У цьому контексті вони постають як експеримент із формою, матеріалом і сприйняттям, який демонструє, як одна ідея може існувати в різних візуальних «тілах».

Такий підхід до взаємодії мистецтва й штучного інтелекту відкриває нові можливості для творчого переосмислення звичних образів. Водночас він має практичну цінність, оскільки є корисним для навчальних і наукових цілей, зокрема для пояснення принципів стилізації та візуалізації складних структур.

Наступним етапом дослідження є аналіз можливостей використання різних програмних засобів і платформ штучного інтелекту для створення НаноАрт в межах єдиного стилістичного підходу. Зокрема, розглядається 3D-стилізація, яка дозволяє наочно відтворити просторову організацію мікро- та наноструктур, підкреслити їхню об'ємність, рельєф і взаємне розташування елементів, а також покращити розуміння структурно-функціональних особливостей матеріалів.

Розглянемо як приклад методологію стилізації зображення НаноАрт «Соняшники», отриманого зі мікроструктури чавуну з кулястим графітом на феритній основі (рис. 2а), в 3D-стиль за допомогою різних інструментів штучного інтелекту. Слід зазначити, що квітка соняшнику символізує сонце, тепло, відродження та життєву силу, тому й НаноАрт «Соняшники» підкреслює невичерпну енергію життя

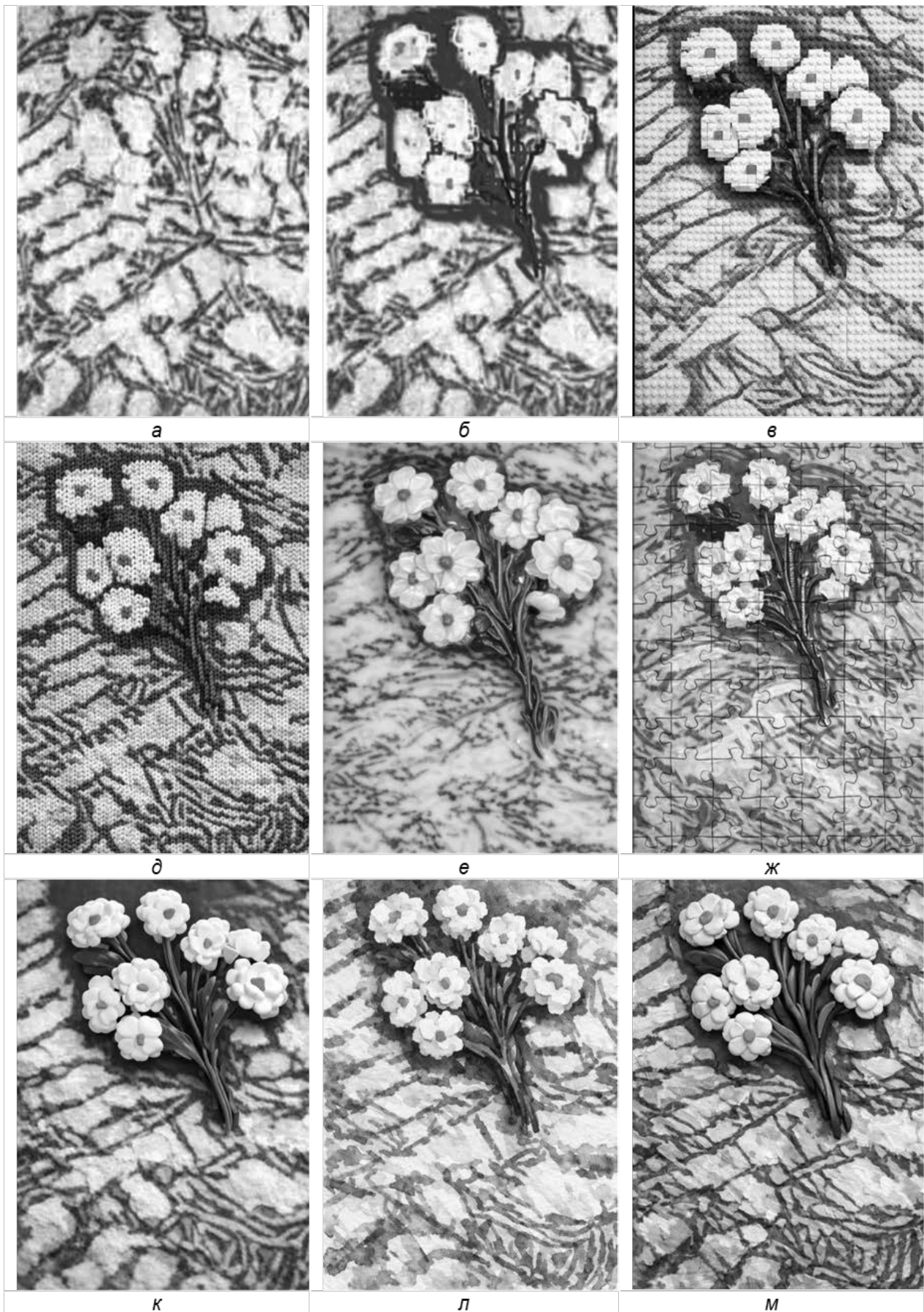


Рис. 1. НаноАрт «Примула»: а — вихідна мікструктура ливарного сплаву алюмінію (не модифікований силумін), $\times 200$ [32]; б — НаноАрт, створений за допомогою графічного редактора Adobe Photoshop; в–м — НаноАрт, створений за допомогою генеративної моделі штучного інтелекту ChatGPT 5.2 відповідно в стилі LEGO (в), в'язаному стилі (д), порцеляновому стилі (е), стилі пазлів (ж), стилі 3D (к), стилі акварель (л) та стилі глини (м)

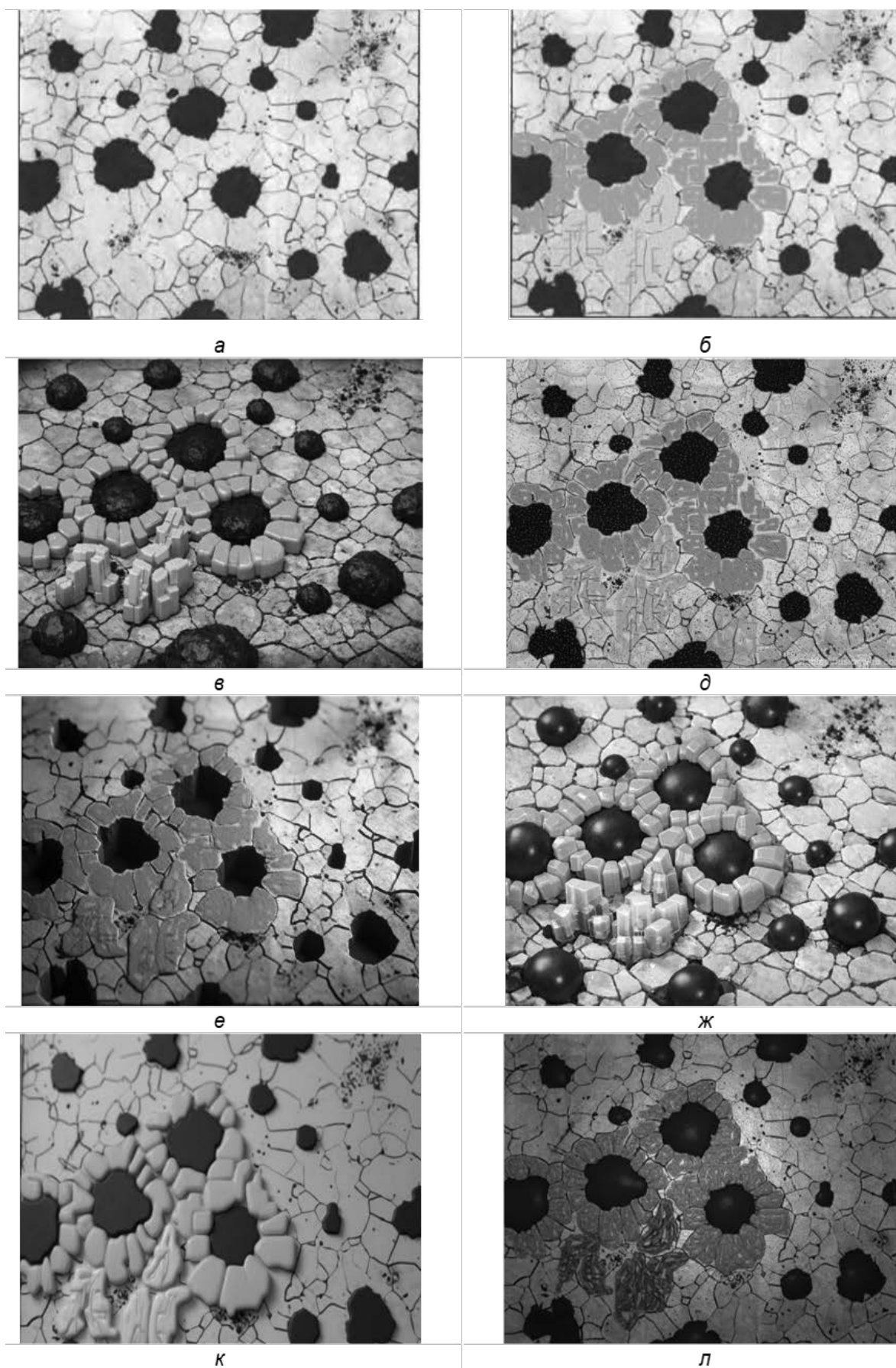


Рис. 2.

НаноАрт «Соняшники»: а — вихідна мікроструктура чавуну з кулястим графітом на феритній основі, $\times 100$ [33]; б — НаноАрт, створений за допомогою графічного редактора Adobe Photoshop; в–ж — НаноАрт, створений в 3D стилі відповідно за допомогою різних генеративних моделей штучного інтелекту: ChatGPT 5.2 (в), Stable Diffusion (д), Seedream 4.5 (е) (платформа EaseMate AI), Midjourney (ж) (платформа EaseMate AI), FLUX Kontext Max (к) (платформа EaseMate AI), Adobe Firefly (л)

навіть у мікросвіті, демонструючи гармонію між природою та наукою, а також красу й силу, приховані у найменших структурах буття.

Для найбільш швидкої генерації високодеталізованих зображень мікроструктур у 3D-стилі як інструмент штучного інтелекту використовується ChatGPT 5.2. Отриманий результат (рис. 2в) вирізняється високою точністю, реалістичною деталізацією та візуальною виразністю, що дозволяє ефективно передавати складну структуру мікросвіту.

В якості другого інструменту ШІ використовується генеративна нейромережа Stable Diffusion. Механізм створення зображень відбувається за наступним ланцюгом: Stable Diffusion → Редактор зображень → Модель → Стиль (обираємо 3D анімація) = готове зображення (рис. 2д).

Наступник крок — зміна інструменту штучного інтелекту на платформу EaseMate AI (генератор зображень на основі ШІ). Механізм створення зображення відбувається також дотримуючись наступної послідовності дій: платформа EaseMate AI → AI Конвертер Фото → Стиль зображення (обираємо 3D) → Модель (обираємо Seedream 4.5, Midjourney та FLUX Kontext Max) = готове зображення (рис. 2е, рис. 2ж та рис. 2к). Слід зазначити, що Midjourney є оптимальним інструментом для художньої стилізації та досягнення «вау-ефекту», оскільки він забезпечує виразну естетичну інтерпретацію, працюючи з кольором і освітленням як художник.

Представляється можливим також 3D-стилізація зображення НаноАрт «Соняшники» за допомогою генеративної платформи Adobe Firefly (рис. 2л). Отриманий результат (рис. 2л) відрізняється від попередніх зображень тим, що стилізація накладається обережно, без радикальної зміни композиції. Сам Firefly оптимізований під дизайн, тому і зображення має «чистіший» комерційний вигляд.

Отже, представлена вище методологія стилізації зображення НаноАрт відкриває дослідникові можливість розкрити власний творчий потенціал, представити результати своєї роботи широкій аудиторії, розвинути міждисциплінарні компетентності та сформувані інноваційне мислення.

Одним з напрямів подальших досліджень відповідно до представленої вище роботи є поглиблене вивчення можливостей застосування ШІ для створення та аналізу зображень НаноАрт, інтеграції цих технологій в освітній процес, а також розробка методичних підходів до використання зображень НаноАрт як інструменту розвитку креативного мислення та міждисциплінарних компетентностей здобувачів вищої освіти.

Серед рекомендацій для науковців та здобувачів вищої освіти за спеціальностями G8 «Матеріалознавство» та G10 «Металургія» щодо етичного та раціонального використання штучного інтелекту при створенні та обробці зображень НаноАрт слід виділити:

1. Необхідно використовувати штучний інтелект як інструмент візуалізації, а не джерело наукових істин.

Згенеровані зображення НаноАрт слід застосовувати для ілюстрації та кращого розуміння мікроструктур металів і сплавів, обов'язково звіряючи їх із реальними мікрофотографіями, фазовими діаграмами та навчально-науковою літературою.

2. Слід перевіряти наукову коректність зображень.

Під час роботи зі штучним інтелектом необхідно критично оцінювати відповідність згенерованих зображень реальним структурним елементам матеріалів (зокрема зернам, межах зерен, фазам та неметалевим включенням), а також коректність відображення їхніх масштабних і морфологічних характеристик.

3. Треба зазначити в навчальних (презентаціях, рефератах, курсових та кваліфікаційних роботах) та наукових роботах (статтях, тезах доповідей) не лише ступінь використання штучного інтелекту, а й обрані інструменти та платформи, налаштування й параметри, критичний аналіз результатів, внесок людини та дотримання етичних і правових норм.

4. Варто поєднувати аналітичну та творчу складові навчання.

Використання зображень НаноАрт має доповнювати аналітичний аналіз мікроструктур металів та сплавів, сприяючи розвитку креативного мислення без втрати інженерної та наукової точності.

5. Необхідно формувати цифрову та професійну компетентності здобувачів вищої освіти.

Насамперед доцільно розвивати навички роботи з цифровими інструментами ШІ разом із умінням інтерпретувати отримані результати з позицій матеріалознавства та металургії.

6. Належить дотримуватися принципів академічної доброчесності.

Забороняється використовувати ШІ для автоматичного створення повних навчальних або наукових робіт без власного аналізу та висновків.

7. Слід враховувати етичні та правові аспекти застосування штучного інтелекту.

Необхідно зважати на авторські права та умови використання різних платформ штучного інтелекту, особливо при публікації зображень НаноАрт у відкритому доступі.

Висновки

1. Визначено, що штучний інтелект активно інтегрується в освітній процес, персоналізуючи навчання та забезпечуючи адаптивність та інтерактивність освіти. Він насамперед є ефективним інструментом оптимізації освітнього процесу та сприяє полегшенню роботи як науково-педагогічних працівників, так і здобувачів вищої освіти, відкриваючи широкі можливості для підвищення якості освіти. Водночас ШІ не може повністю замінити традиційне навчання, а виступає лише допоміжним засобом, здатним суттєво збагатити організацію освітнього процесу та підвищити якість надання освітніх послуг за умови його етичного й раціонального використання.

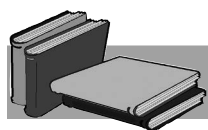
2. Проаналізовано переваги й обмеження за-

стосування генеративних інструментів штучного інтелекту в освітньо-науковій діяльності. Надано рекомендації для науковців та здобувачів вищої освіти за спеціальностями G8 «Матеріалознавство» та G10 «Металургія» щодо етичного та раціонального використання штучного інтелекту при створенні та обробці зображень НаноАрт, спрямовані на дотримання академічної доброчесності, розвитку цифрових компетентностей та забезпечення наукової достовірності результатів освітньої діяльності.

3. Показано доцільність використання зображень НаноАрт як інноваційного засобу візуалізації мікроскопічних структур в освітньому процесі, що,

своєю чергою, сприяє розвитку креативного мислення, формуванню цифрової компетентності та підвищенню навчальної мотивації здобувачів вищої освіти.

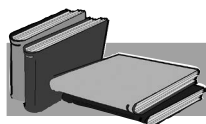
4. Встановлено, що комбінування різних інструментів штучного інтелекту з різноманітними стилями візуалізації зображень (зокрема, стиль LEGO, порцеляновий стиль, 3D стиль, в'язаний стиль, стиль пазлів тощо) сприяє творчим експериментам із формами, текстурами, матеріалами та візуальними ефектами, що відіграє ключову роль у створенні зображень НаноАрт та креативних цифрових зображень.



ЛІТЕРАТУРА

1. Зелінська Д. Індустрія 4.0 та її вплив на країни світу в контексті досягнення цілей сталого розвитку — 2030. *Галицький економічний вісник*. 2024. Том 91. № 6. С. 133—141. https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.06.133
2. Kalidindi S.R., Graef M.De. Materials Data Science: Current Status and Future Outlook. *Annual Review of Materials Research*. 2015. Vol. 45. P. 171—193. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-020844>
3. Pasupuleti M.K. Chapter IV: AI-Powered Materials Innovation: Accelerating Design and Discovery in Advanced Materials. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations*. 2024. Vol. 04. Iss. 11. P. 112—162. <https://doi.org/10.62311/nesx/46618>
4. Agrawal A., Choudhary A. Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the «fourth paradigm» of science in materials science. *APL Materials*. 2016. Vol. 4. Iss. 5. 053208. <https://doi.org/10.1063/1.4946894>
5. Ковальов Ю.Г., Аулін В.В., Ковальов С.Г., Кузик О.В., Гриньків А.В. Штучний інтелект у матеріалознавчих дослідженнях: тенденції, інструменти та трансформації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43). Ч. II. С. 134—142. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.134-142](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.134-142)
6. Пашинська О.Г., Завдовєєв А.В. Штучний інтелект у матеріалознавстві: зміни у відкритті та розробці матеріалів. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 152—163. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-17>
7. Dimiduk D.M., Holm E.A., Niezgoda S.R. Perspectives on the Impact of Machine Learning, Deep Learning, and Artificial Intelligence on Materials, Processes, and Structures Engineering. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2018. Vol. 7. P. 157—172. <https://doi.org/10.1007/s40192-018-0117-8>
8. Абрамович А.О., Зайцев Є.О., Піддубний В.О. Застосування штучного інтелекту для ідентифікації металів вихрострумовою системою. *Scientific Collection «InterConf+»*. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference «Theory and Practice of Science: Key Aspects» (July 19—20, 2023, Rome, Italy). 2023. № 35(163). С. 287—298. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.07.2023.028>
9. Ковальов Ю.Г., Аулін В.В., Ковальов С.Г., Кузик О.В., Гриньків А.В. Цифровізація матеріалознавства й напрями використання штучного інтелекту. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2025. № 111. С. 67—74. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.67>
10. Goswami L., Deka M.K., Roy M. Artificial Intelligence in Material Engineering: A Review on Applications of Artificial Intelligence in Material Engineering. *Advanced Engineering Materials*. 2023. Vol. 25. Iss. 13. 2300104. <https://doi.org/10.1002/adem.202300104>
11. Xu Y., Liu X., Cao X. et al. Artificial intelligence: A powerful paradigm for scientific research. *The Innovation*. 2021. Vol. 2. Iss. 4. 100179. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100179>
12. Yang H., Qiu H., Xiang Q., Tang S., Guo H. Exploring Elastoplastic Constitutive Law of Microstructured Materials Through Artificial Neural Network — A Mechanistic-Based Data-Driven Approach. *Journal of Applied Mechanics*. 2020. Vol. 87. Iss. 9. 091005. <https://doi.org/10.1115/1.4047208>
13. Wang K., Sun W. Meta-modeling game for deriving theory-consistent, microstructure-based traction–separation laws via deep reinforcement learning. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019. Vol. 346. P. 216—241. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.026>
14. Guo K., Yang Z., Yu C.-H., Buehler M.J. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials. *Materials Horizons*. 2021. No. 8. P. 1153—1172. <https://doi.org/10.1039/d0mh01451f>
15. Xie E., Yang C. AI Design for High Entropy Alloys: Progress, Challenges and Future Prospects. *Metals*. 2025. No. 15(9). 1012. <https://doi.org/10.3390/met15091012>
16. Kumar A., Mukhopadhyay N.K., Yada T.P. Recent progresses on high entropy alloy development using machine learning: A review. *Computational Materials Today*. 2025. Vol. 8. 100038. <https://doi.org/10.1016/j.commt.2025.100038>

17. Lu B., Xia Y., Ren Y. et al. When Machine Learning Meets 2D Materials: A Review. *Advanced Science*. 2024. Vol. 11. Iss. 13. 2305277. <https://doi.org/10.1002/advs.202305277>
18. Xie W., Sun Y., Wang C., Li M., Li F., Liu Y. Artificial intelligence can recognize metallic glasses in vast compositional space with sparse data. *npj Computational Materials*. 2025. Vol. 11. Article number: 254. <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01753-9>
19. Wei Q., Cao B., Yuan H. et al. Divide and conquer: Machine learning accelerated design of lead-free solder alloys with high strength and high ductility. *npj Computational Materials*. 2023. Vol. 9. Article number: 201. <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01150-0>
20. Han X.-Q., Wang X.-D., Xu M.-Y. et al. AI-Driven Inverse Design of Materials: Past, Present, and Future. *Chinese Physics Letters*. 2025. Vol. 42. No. 2. 027403. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/42/2/027403>
21. Yao J., Wang J., Yu W. et al. Alloy design integrating natural language processing and machine learning: breakthrough development of low-cost, high-performance Ni-based single-crystal superalloys. *npj Computational Materials*. 2026. Vol. 12. Article number: 38. <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01906-w>
22. Wang Y., Wang K., Zhang C. Applications of artificial intelligence/machine learning to high-performance composites. *Composites. Part B: Engineering*. 2024. Vol. 285. 111740. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111740>
23. Cao G., Ouyang R., Ghiringhelli L.M. et al. Artificial intelligence for high-throughput discovery of topological insulators: The example of alloyed tetradymites. *Physical Review Materials*. 2020. No. 4. 034204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.034204>
24. Zhang X., Wang X., Wang W. et al. Machine learning–driven thermoelectric materials: Review on prediction, optimization, and discovery. *Journal of Alloys and Compounds*. 2026. Vol. 1050. 185711. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.185711>
25. Kaplan D., Zheng A., Blawat J. et al. Deep learning-based superconductivity prediction and experimental tests. *The European Physical Journal Plus*. 2025. Vol. 140. No. 58. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05947-w>
26. Mo W., Wang J., Yuan G., Cao D., Bai G. Application of machine learning in magnetocaloric materials: A review. *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 44. 111933. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111933>
27. Сазанішвілі З.В., Мацюк І.М., Вернер І.В. Штучний інтелект в освітньому процесі студентів спеціальності 132 Матеріалознавство. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2024. № 107. С. 69—73. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.69>
28. Коломієць А.М., Кушнір О.І. Використання штучного інтелекту в освітній та науковій діяльності: можливості та виклики. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*. 2023. Вип. 70. С. 45—57. <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2023-70-45-57>
29. Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Борсук С.А. Використання штучного інтелекту в освітньому процесі за спеціальністю G10 «Металургія». *Наука і металургія: Всеукраїнська науково-технічна конференція: збірник тез (Дніпро, 19—20 листопада 2025 р.)*. Дніпро, 2025. С. 29.
30. Блощинський І.Г., Дяк В.В., Якимчук А.В., Палагнюк М.Г. Синергія імерсивних технологій і штучного інтелекту в освітній діяльності. *Вісник науки та освіти*. 2025. № 5(35). С. 1054—1066. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-5\(35\)-1054-1066](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-5(35)-1054-1066)
31. Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Борсук С.А. Використання штучного інтелекту в освітньому процесі за спеціальністю G10 «Металургія». *Сучасні технології промислового комплексу – 2025: міжнародна науково-практична конференція (Херсон-Хмельницький, 17—19 вересня 2025р.)*. Херсон, Хмельницький: ХНТУ, 2025. № 9. С. 100—102.
32. Warmuzek M. Aluminum-silicon casting alloys: atlas of microfractographs. *ASM International*. 2004. 124 p. ISBN: 978-0-87170-794-9
33. Большаков В.И., Сухомлин Г.Д., Лаухин Д.В. Атлас структур металлов и сплавов. Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2010. 174 с.
34. Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Піщенко К.А. НаноАрт та металургія: симбіоз мистецтва та нанотехнологій під час війни. *Метал та лиття України*. 2025. Т. 33. № 3—4(342—343). С. 53—63. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.053>
35. Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Піщенко К.А. НаноАрт та металургія: використання інформаційних технологій при обробці мікро-та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів. *Наука та виробництво*. 2025. № 30. С. 69—80. <https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347069>
36. Воденнікова О.С., Воденніков С.А. НаноАрт та металургія: використання штучного інтелекту для обробки структур металів та сплавів. *Метал та лиття України*. 2026. Т. 34. № 1 (344). С. 55—64. <https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.055>



REFERENCES

1. Zelinska, D. (2024). Industry 4.0 and its impact on world countries in the context of achieving the 2030 sustainable development goals. *Galician economic journal*, 91(6), 133-141. https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.06.133 [in Ukrainian].
2. Kalidindi, S. R., & Graef, M. De. (2015). Materials Data Science: Current Status and Future Outlook. *Annual Review of Materials Research*, 45, 171-193. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-020844>
3. Pasupuleti, M. K. (2024). Chapter IV: AI-Powered Materials Innovation: Accelerating Design and Discovery in Advanced Materials. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations*, 04(11), 112-162. <https://doi.org/10.62311/nex/46618>
4. Agrawal, A., & Choudhary, A. (2026). Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the “fourth paradigm” of science in materials science. *APL Materials*, 4(5). 053208. <https://doi.org/10.1063/1.4946894>
5. Kovalov, Yu., Aulin, V., Kovalov, S., Kuzyk, O., & Hrynkiv, A. (2025). Artificial Intelligence in Materials Research: Trends, Tools, and Transformations. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 12(43), II, 134-142. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.134-142](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.134-142) [in Ukrainian].
6. Pashynska, O., & Zavdovieiev, A. (2025). Artificial intelligence in materials science: changes in materials discovery and development. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical sciences*, (5), 152-163. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-17> [in Ukrainian].
7. Dimiduk, D. M., Holm, E. A., & Niezgodna, S. R. (2018). Perspectives on the Impact of Machine Learning, Deep Learning, and Artificial Intelligence on Materials, Processes, and Structures Engineering. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 7, 157-172. <https://doi.org/10.1007/s40192-018-0117-8>
8. Abramovich, A. O., Zaitsev, E. O., & Piddubny, V. O. (2023). Application of artificial intelligence for metal identification by eddy current system. *Scientific Collection “InterConf+”*. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference “Theory and Practice of Science: Key Aspects” (July 19-20, 2023, Rome, Italy), 35(163), 287-298. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.07.2023.028> [in Ukrainian].
9. Kovalov, Yu., Aulin, V., Kovalov, S., Kuzyk, O., & Hrynkiv, A. (2025). Digitalization of Materials Science and Directions for the Application of Artificial Intelligence. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, (111), 67-74. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.67> [in Ukrainian].
10. Goswami, L., Deka, M. K., & Roy, M. (2023). Artificial Intelligence in Material Engineering: A Review on Applications of Artificial Intelligence in Material Engineering. *Advanced Engineering Materials*, 25(13). 2300104. <https://doi.org/10.1002/adem.202300104>
11. Xu, Y., Liu, X., Cao, X. et al. (2021). Artificial intelligence: A powerful paradigm for scientific research. *The Innovation*, 2(4). 100179. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100179>
12. Yang, H., Qiu, H., Xiang, Q., Tang, S., & Guo, H. (2020). Exploring Elastoplastic Constitutive Law of Microstructured Materials Through Artificial Neural Network – A Mechanistic-Based Data-Driven Approach. *Journal of Applied Mechanics*, 87(9). 091005. <https://doi.org/10.1115/1.4047208>
13. Wang, K., & Sun, W. (2019). Meta-modeling game for deriving theory-consistent, microstructure-based traction–separation laws via deep reinforcement learning. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 346, 216-241. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.026>
14. Guo, K., Yang, Z., Yu, C.-H., & Buehler, M. J. (2021). Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials. *Materials Horizons*, (8), 1153-1172. <https://doi.org/10.1039/d0mh01451f>
15. Xie, E., & Yang, C. (2025). AI Design for High Entropy Alloys: Progress, Challenges and Future Prospects. *Metals*, 15(9). 1012. <https://doi.org/10.3390/met15091012>
16. Kumar, A., Mukhopadhyay, N. K., & Yada, T. P. (2025). Recent progresses on high entropy alloy development using machine learning: A review. *Computational Materials Today*, 8, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.commt.2025.100038>
17. Lu, B., Xia, Y., Ren, Y. et al. (2024). When Machine Learning Meets 2D Materials: A Review. *Advanced Science*, 11(13). 2305277. <https://doi.org/10.1002/advs.202305277>
18. Xie, W., Sun, Y., Wang, C., Li, M., Li, F., & Liu, Y. (2025). Artificial intelligence can recognize metallic glasses in vast compositional space with sparse data. *npj Computational Materials*, 11, Article number: 254. <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01753-9>
19. Wei, Q., Cao, B., Yuan, H., Chen, Y., You, K., Yu, S., Yang, T., Dong, Z., & Zhang, T.-Y. (2023). Divide and conquer: Machine learning accelerated design of lead-free solder alloys with high strength and high ductility. *npj Computational Materials*, 9, Article number: 201. <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01150-0>
20. Han, X.-Q., Wang, X.-D., Xu, M.-Y., Feng, Z., Yao, B.-W., Guo, P.-J., Gao, Z.-F., & Lu, Z.-Y. (2025). AI-Driven Inverse Design of Materials: Past, Present, and Future. *Chinese Physics Letters*, 42(2). 027403. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/42/2/027403>
21. Yao, J., Wang, J., Yu, W., Chen, Y., Li, W., Wei, J., Zhao, Y., Wang, Y., Wang, L., Tan, L., Huang, L., Liu, F., & Liu, Y. (2026). Alloy design integrating natural language processing and machine learning: breakthrough development of low-cost, high-performance Ni-based single-crystal superalloys. *npj Computational Materials*, 12, Article number: 38. <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01906-w>

22. Wang, Y., Wang, K., & Zhang, C. (2024). Applications of artificial intelligence/machine learning to high-performance composites. *Composites. Part B: Engineering*, 285. 111740. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111740>
23. Cao, G., Ouyang, R., Ghiringhelli, L. M., Scheffler, M., Liu, H., Carbogno, C., & Zhang, Z. (2020). Artificial intelligence for high-throughput discovery of topological insulators: The example of alloyed tetradymites. *Physical Review Materials*, (4). 034204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.034204>
24. Zhang, X., Wang, X., Wang, W., Yuan, Z., Peng, J., Shi, Y., He, P., & Chang, Y. (2026). Machine learning-driven thermoelectric materials: Review on prediction, optimization, and discovery. *Journal of Alloys and Compounds*, 1050. 185711. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.185711>
25. Kaplan, D., Zheng, A., Blawat, J., Jin, R., & Cava, R. J. (2025). Deep learning-based superconductivity prediction and experimental tests. *The European Physical Journal Plus*, 140(58). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05947-w>
26. Mo, W., Wang, J., Yuan, G., Cao, D., & Bai, G. (2025). Application of machine learning in magnetocaloric materials: A review. *Materials Today Communications*, 44, 111933. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111933>
27. Sazanishvili, Z., Matsiuk, I., & Verner, I. (2024). Artificial Intelligence in the Educational Process of Students of Specialty 132 Material Science. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, (107), 69-73. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.69> [in Ukrainian].
28. Kolomiets, A. M., & Kushnir, O. I. (2023). Use of artificial intelligence in educational and scientific activities: opportunities and challenges. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems*, (70), 45-57. <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2023-70-45-57> [in Ukrainian].
29. Vodennikova, O. S., Vodennikov, S. A., & Borsuk, S. A. (2025). The use of artificial intelligence in the educational process in the specialty G10 "Metallurgy". Science and Metallurgy: All-Ukrainian Scientific and Technical Conference: Collection of Abstracts (Dnipro, November 19–20, 2025). Dnipro, p. 29 [in Ukrainian].
30. Bloschchynskiy, I. H., Dyiak, V. V., Yakymchuk, A. V., & Palahniuk, M. H. (2025). Synergy of immersive technologies and artificial intelligence in educational activities. *Bulletin of Science and Education*, 5(35), 1054-1066. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-5\(35\)-1054-1066](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-5(35)-1054-1066) [in Ukrainian].
31. Vodennikova, O. S., Vodennikov, S. A., & Borsuk S. A. (2025). The use of artificial intelligence in the educational process in the specialty G10 "Metallurgy". Modern technologies of the industrial complex – 2025: International scientific and practical conference (Kherson–Khmelnitskyi, September 17–19, 2025). Kherson, Khmelnytskyi: Kherson National Technical University, No. 9, pp. 100-102 [in Ukrainian].
32. Warmuzek, M. (2004). Aluminum-silicon casting alloys: atlas of microfractographs. ASM International. 124 p. ISBN: 978-0-87170-794-9
33. Bolshakov, V. I., Sukhomlin, G. D., & Laukhin, D. V. (2010). Atlas struktur metallov i splavov [Atlas of metal and alloy structures]. State Higher Educational Institution "PGACEA" [in Russian].
34. Vodennikova, O. S., Vodennikov, S. A., & Pishchenko, K. A. (2025). NanoArt and Metallurgy: Symbiosis of Art and Nanotechnology During Wartime. *Metal and Casting of Ukraine*, 33(3–4(342–343)), 53-63. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.053> [in Ukrainian].
35. Vodennikova, O. S., Vodennikov, S. A., & Pishchenko, K. A. (2025). NanoArt and metallurgy: use of information technologies in processing micro- and macrostructures of ferro and non-ferro metals and alloys. *Science and production*, (30), 69-80. <https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347069> [in Ukrainian].
36. Vodennikova, O. S., & Vodennikov, S. A. (2026). NanoArt and Metallurgy: Using Artificial Intelligence to Process Metal and Alloy Structures. *Metal and Casting of Ukraine*, 34(1(344)), 55-64. <https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.055> [in Ukrainian].

Надійшла/Received 12.03.2026

Прийнята/Accepted 12.05.2026

Опублікована/Published 29.05.2026

Summary

O.S. Vodennikova¹, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor, e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0496-5435>

S.A. Vodennikov², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor, e-mail: s_vodennikov@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5563-5244>

¹Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

²National University "Zaporizhzhia Polytechnic" (Zaporizhzhia, Ukraine)

Synergy of Artificial Intelligence and Materials Science in the Creation of NanoArt Images Based on Metal and Alloy Structures

In the context of digital transformation and sustainable development, a synergy between artificial intelligence and materials science is emerging. In particular, within the framework of Industry 4.0, researchers in the fields of G8 "Materials Science" and G10 "Metallurgy" focus on the implementation of digital technologies for the creation of "smart" materials, modeling of material properties and structures, automation of production processes, and the development of digital twins, among other areas. This study emphasizes the use of artificial intelligence (AI) to enhance the quality of microfractographic images of metal and alloy structures (including the removal of scratches and dust, as well as improved sharpness, contrast, and grain detail), followed by the creation of NanoArt images in the form of landscapes, animals, objects, and other artistic compositions. As AI-based tools for creating NanoArt images, both specialized scientific software (MountainsMap, Gwyddion, ImageJ/Fiji) and graphic editors with AI support (Adobe Photoshop with the Generative Fill function, Affinity Photo, Luminar Neo), generative neural networks (ChatGPT, Midjourney, Stable Diffusion, Adobe Firefly), and mobile applications (Prisma or Pikazo) can be utilized. The study also examines the application of various AI tools as well as different visual stylizations (e.g., LEGO-style, porcelain style, 3D style, knitted style, puzzle style, and others), which enable the exploration of diverse forms, textures, materials, and visual effects and are significant for the creation of NanoArt and other creative digital images. Special attention is given to the aesthetic aspect of the resulting NanoArt images: the transformation of black-and-white images of metal and alloy structures into multicolored artistic compositions demonstrates the beauty of the microworld and the ability to perceive not only the functional but also the artistic value of research outcomes.

Keywords

Materials science, digitalization, digital metallography, metal and alloy structures, artificial intelligence, artificial intelligence tools, ChatGPT, NanoArt, image stylization.