

Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Піщенко К.А.

СИНЕРГІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ПРИ СТВОРЕННІ ЗОБРАЖЕНЬ НАНОАРТ: ПЕРСПЕКТИВИ, ПРОБЛЕМИ ТА МОЖЛИВОСТІ

Використання штучного інтелекту (ШІ) в матеріалознавстві відкриває нові можливості для аналізу мікроструктур матеріалів, автоматизованого розпізнавання фазових складових, прогнозування властивостей матеріалів, а також покращення якості мікроскопічних зображень. Застосування таких технологій ШІ має низку переваг, зокрема підвищення точності та об'єктивності аналізу, скорочення часу обробки даних, зменшення впливу людського фактора та забезпечення ефективної обробки великих масивів інформації.

Водночас сучасні цифрові технології та методи обробки зображень створюють нові можливості для розвитку напряму НаноАрт, який поєднує наукову візуалізацію наноструктур із художньою інтерпретацією отриманих зображень. У межах цього напряму особливо виразно проявляється повторюваність форм у природі: структури, що існують на рівні атомів і молекул, нерідко відтворюють контури пейзажів, живих істот, космічних об'єктів, натюрмортів чи інших предметів матеріального світу, засвідчуючи універсальність природних закономірностей.

Сучасні AI-генератори (моделі ChatGPT та Gemini) дозволяють автоматизовано аналізувати та покращувати мікро- і нанозображення, підвищуючи їхню деталізацію, контрастність і художню виразність, що сприяє більш ефективній комунікації наукових даних і створенню естетично виразних візуальних образів мікросвіту.

Можливість експериментувати зі стилями та візуалізацією (наприклад, створювати зображення в 3D-стилі, у стилі LEGO, порцеляновому стилі, в'язаному стилі, стилі пазлів та інших) розкриває нові підходи до художньої інтерпретації мікро- та наноструктур матеріалів, сприяє підвищенню візуальної виразності зображень та розширює можливості популяризації наукових результатів через поєднання елементів науки, цифрового мистецтва і сучасних технологій.

Незважаючи на значний потенціал використання ШІ для створення зображень НаноАрт, науковці стикаються з низкою проблем і обмежень, серед яких є: обмежена наукова точність та ризик викривлення даних, недостатній контроль над мікродеталізацією, можливість надмірної художньої стилізації, залежність від компетенцій автора, освітні та когнітивні ризики, а також питання авторського права та етичні аспекти застосування ШІ в контексті створення зображень НаноАрт.

Отже, синергія штучного інтелекту та матеріалознавства формує новий міждисциплінарний підхід до створення НаноАрт, поєднуючи алгоритмічні методи аналізу й генерації зображень із керуванням структурою та властивостями матеріалів на нанорівні.

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

Постановка проблеми. В сучасних умовах інформатизація освіти виступає ключовим чинником підвищення ефективності освітнього процесу в закладах вищої освіти (ЗВО), забезпечуючи формування цифрової культури, розвитку цифрових компетентностей як

викладачів, так і здобувачів освіти [1]. Завдяки використанню сучасних ІТ-засобів ЗВО можуть забезпечити здобувачам вищої освіти доступ до актуальної інформації, інтерактивний освітній процес та сприяння розвитку наукової діяльності [2]. Саме наукова діяльність здобувачів вищої освіти розширює їх світогляд, виховує потяг до самоосвіти, розвиває мислення, надає уміння спостерігати, аналізувати, творчо інтерпретувати результати інших досліджень [3].

Значний інтерес у науковців викликає цифровізація матеріалознавства, впровадження інструментів та методів ШІ в процесі прогнозування властивостей матеріалів, оптимізації їх складу, моделювання їх структури та проектування матеріалів, що дає змогу підвищити точність наукових досліджень, оптимізувати експериментальні дослідження та суттєво скоротити час розроблення нових матеріалів [4–28].

У цьому контексті особливої актуальності набуває проблема цифрової трансформації підготовки здобувачів освіти, наприклад за спеціальностями G8 «Матеріалознавство» та G10 «Металургія», оскільки впровадження сучасних цифрових рішень змінює зміст освітнього процесу, науково-дослідну роботу та формування професійних компетентностей майбутніх фахівців в умовах глобальної технологічної модернізації. Застосування цифрових двійників технологічних процесів, віртуальних лабораторій і симуляційного моделювання дозволяє здобувачам не лише засвоювати теоретичні знання, а й набувати практичних навичок аналізу структури й властивостей матеріалів, прогнозування поведінки металів і сплавів у різних умовах експлуатації, оптимізації технологічних режимів виробництва. Це особливо важливо в умовах обмеженого доступу до матеріально-технічної бази та під час дистанційного навчання.

Так у **Запорізькому національному університеті** з метою забезпечення цифрової трансформації освітньо-наукового процесу активно впроваджуються сучасні цифрові інструменти, технології цифрової металографії та інформаційно-комунікаційні рішення для дослідження структури й властивостей металів і сплавів, що сприяє підвищенню якості підготовки здобувачів вищої освіти та розширенню можливостей проведення наукових досліджень. Під час дистанційного навчання синергія теоретичних і практичних знань із матеріалознавства з потенціалом цифрових технологій стала основою для розвитку наукових досліджень, присвячених напряму НаноАрт – міждисциплінарній галузі, що поєднує аналіз мікро- та наноструктур матеріалів із їх художньою інтерпретацією засобами цифрової візуалізації та алгоритмів штучного інтелекту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Напряму НаноАрт відомий у всьому світі як мистецько-науковий феномен, що візуалізує невидимий світ атомів і молекул, відображаючи закономірності природи, які присутні як на макро-, так і на макрорівнях. У цьому контексті НаноАрт демонструє дивовижну повторюваність форм: структури, що існують на рівні атомів, нерідко відтворюють контури пейзажів (рис. 1а, рис. 1б, рис. 1д, рис. 1е), живих істот (рис. 1в), космосу (рис. 1ж), натюрморт (рис. 2в) чи предметів матеріального світу (рис. 2д), засвідчуючи універсальність природних закономірностей.

На конкурсах і виставках науковці з різних країн світу демонструють безліч цікавих і неординарних зображень НаноАрт, які поєднують точність науки та художню уяву, надихаючи глядачів на роздуми про красу природи та технологій:

– конкурсі UNAM NanoArt та NanoPoster [29].

Наприклад, в SEM-зображенні частинок оксидоміду вісмуту кристали природним чином формують сферичні структури з безліччю тонких пластинок, що робить їх схожими на квіти – пухнасті голівки кульбаб, тим самим даючи змогу побачити вражаючий витвір мистецтва – НаноАрт «Молекулярні кульбаби» (рис. 1б).

Природний візерунок жилок листка, завдяки уяві автора, стало можливим побачити в мікроструктурі електроформованих нановолокон полікапролактону, отриманих методом

електроспінінгу (рис. 1д).

НаноАрт «Нано-жоржина» (рис. 1е) ілюструє **самоорганізовану радіальну мікроструктуру нанодрогів оксиду цинку**, сформовану під час процесу кристалічного росту. Нанодроги виростають із одного центру та розходяться назовні, створюючи структуру, що морфологічно нагадує квітку жоржини.



Рисунок 1 – Приклади зображень НаноАрт, представлені на Конкурсі UNAM NanoArt та NanoPoster [29]: а – «Венерина мухоловка в наносвітах» (мікроструктура поліетилентерефталату, покритого колагеном), Фаїті Фуеркаїті (Fajti Ferhati), Білкентський університет, Туреччина; б – «Молекулярні кульбаби» (мікроструктура частинок BiOBr), Сара Самуєї (Sara Serrano), Білкентський університет, Туреччина; в – «Кіт у Нанокраїні» (мікроструктура бактерій, імобілізованих на фільтрувальному папері), Ілкай Чісіл Коксал (Ilkay Cisol Koksal), Білкентський університет, Туреччина; д – «Нано-жилкування» (мікроструктура електроформованих нановолокон полікапролактону), Аслі Челебіоглу (Ashi Çelebioğlu), Білкентський університет, Туреччина; е – «Нано-жоржина» (мікроструктура нанодрогів ZnO), Зейнеп Джемре Орсел (Zeynep Cemre Örsel), Близькосхідний технічний університет, Туреччина; ж – «Нановсесвіт» (мікроструктура мікрогелю), Аслі Гізем Чинар і Еджем Ердоган (Ashi Gizem Çinar, Esem Erdoğan), Білкентський університет, Туреччина – міжнародному фестивалю наномистецтва (The International Festival of NanoArt) [30], організованому NanoArt 21 та Академією наномистецтва (The Academy of NanoArt).

Найвідомішою картиною засновника напряму НаноАрт, вченого-фізика Кріса Орфеску, є НаноАрт «Уламки» [31], яка створена на основі зображення колоїдної частинки графіту, зануреної в рідкий азот за температури $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, із використанням техніки Digital Faux (рис. 2а).

Використовуючи Adobe Illustrator, Photoshop та Painter А. Джон Валуа створює свій відомий НаноАрт «Розкриваючи таємниці наносфери» (рис. 2б) [32]. Представлене зображення формує симетричну композицію, у якій можна умовно розпізнати образ фантастичного обличчя. Це ілюструє поєднання наукової візуалізації наноструктур із художнім сприйняттям складних морфологічних форм.

– міжнародному конкурсі наукових зображень НаноАртографія (NanoArtography) [33].

На сканувальному електронному мікрознімку відображена хитромудра краса травленого алюмінію, що нагадує стійку квітку, що пережила надзвичайно суворі умови навколишнього середовища (рис. 2в). Травлений алюміній, оброблений водним розчином нітрату цинку та аміаку, демонструє унікальну структуру, що символізує міцність та виживання у складних умовах. Ширина зображення складає $0,014\text{ мм}$ [34].

– міжнародному конкурсі «Наука як мистецтво» (Science as Art), що проводиться Товариством дослідження матеріалів (Materials Research Society) [35].

Наприклад, у чорно-білих наноструктурах ZnO на скляній підкладці, покритій оксидом індію, осаджені при температурі $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ із використанням простого методу електрохімічного осадження, можна умовно розпізнати образ, подібний до ведмежа Тедді (рис. 2д) [36]. Таке поєднання матеріалознавства та образу відомого дитячого персонажа дає змогу наочно продемонструвати особливості морфології наноструктур і водночас підкреслити здатність людського сприйняття знаходити знайомі форми у складних мікро- та нанорозмірних структурах.

– міжнародному онлайн-конкурсі NanoArt K12 (NanoArt K12 International Online Competition) [37].

Специфічна морфологія кристалів оксиду цинку нагадує пелюстки троянд (рис. 2е) [38], які так і хочеться понюхати та відчутти, адже їхня ніжна структура вражає своєю симетрією та гармонією, перетворюючи наноскопічні утворення на справжні мініатюрні витвори мистецтва.

– щорічному конкурсі візуалізації матеріалів (MVC), який спонсорує кафедра матеріалознавства та інженерії (MatSE) та Інститут досліджень матеріалів (MRI) [39].

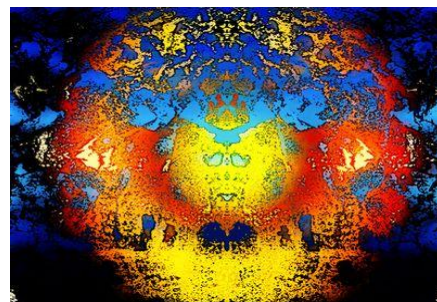
Мікроструктура триоксиду молібдену з орторомбічною кристалічною структурою після художньої обробки нагадує зображення зірок, що світяться, та створює НаноАрт «Комета Моллі: орторомбічні кристали триоксиду молібдену з космосу» (рис. 2ж) [40] вражаюче схоже на деяких з найдивовижніших мешканців нічного неба. Зелено-фіолетове забарвлення «хвоста комети» досягається за рахунок поляризаційної лінзи, прикріпленої до оптичного мікроскопа, у поєднанні з різною орієнтацією оксиду. Фон зображення, здавалося б нецікавим, при найближчому розгляді набуває додаткової інтриги, оскільки дефекти сапфірової підкладки посилюють космічний відтінок твору.

– та інших виставках та конкурсах.

Серед українських робіт, присвячених створенню зображень НаноАрт слід виділити роботи [41–45]. Особливої уваги заслуговує НаноАрт «Блискавка перемоги», який показує, як у кристалах на поверхні фосфіду індію можна розгледіти форму блискавки (рис. 3а) [42]. За задумом авторів, цей НаноАрт представляє очікуване звільнення українських територій і вирішальну перемогу над агресорами. Структура фосфіду індію служить потужною метафорою для вражаючого та швидкого правосуддя, яке чекає, втілюючи сяючу надію на майбутнє.



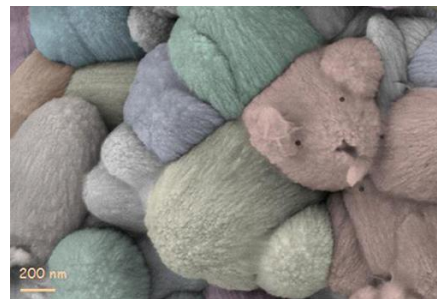
а



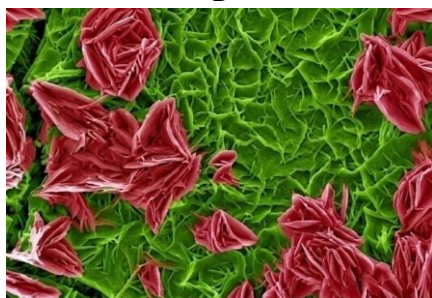
б



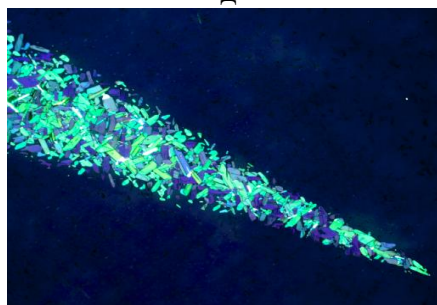
в



д



е



ж

Рисунок 2 – Приклади зображень НаноАрт авторів з різних країн світу: а – «Уламки» («In Pieces»), Кріс Орфеску (Cris Orfescu), NanoArt 21, США [31]; б – «Розкриваючи таємниці наносфери» («Uncovering the Nanosphere»), А. Джон Валуа (A. John Valois), Університет Південної Кароліни, США [32]; в – «Натюрморт» («Still Life»), Мехран Мірмохаммаді (Mehran Mirmohammadi), Університет Аалто, Фінляндія [34]; д – «Нановедмідь Тедді» («Nanobear Teddy»), Хелія Джалілі (Helia Jalili), Університет Ватерлоо, Канада [36]; е – «Рожевий сад» («Rose-garden»), Нгуєну Гігерту (Nguyen Giegert), США [38]; ж – «Комета Моллі: орторомбичні кристали триоксиду молібдену з космосу» («Molly's Comet: Orthorhombic Molybdenum Trioxide Crystals from Outer Space»), Саїд Альмішал (Saeed Almishal), Пенсильванський державний університет, США [40]

Ще один український НаноАрт, який асоціюється з вірою в перемогу, світле майбутнє, відновлення України та народження нового покоління, – «Соняшники» (рис. 36) [43]. У взятій за основу доєвтектичній структурі, отриманій шляхом переплавлення та науглецювання в рідкому стані (перліт і трансформований ледебурит), автори впізнають жовті квіти – соняшники.

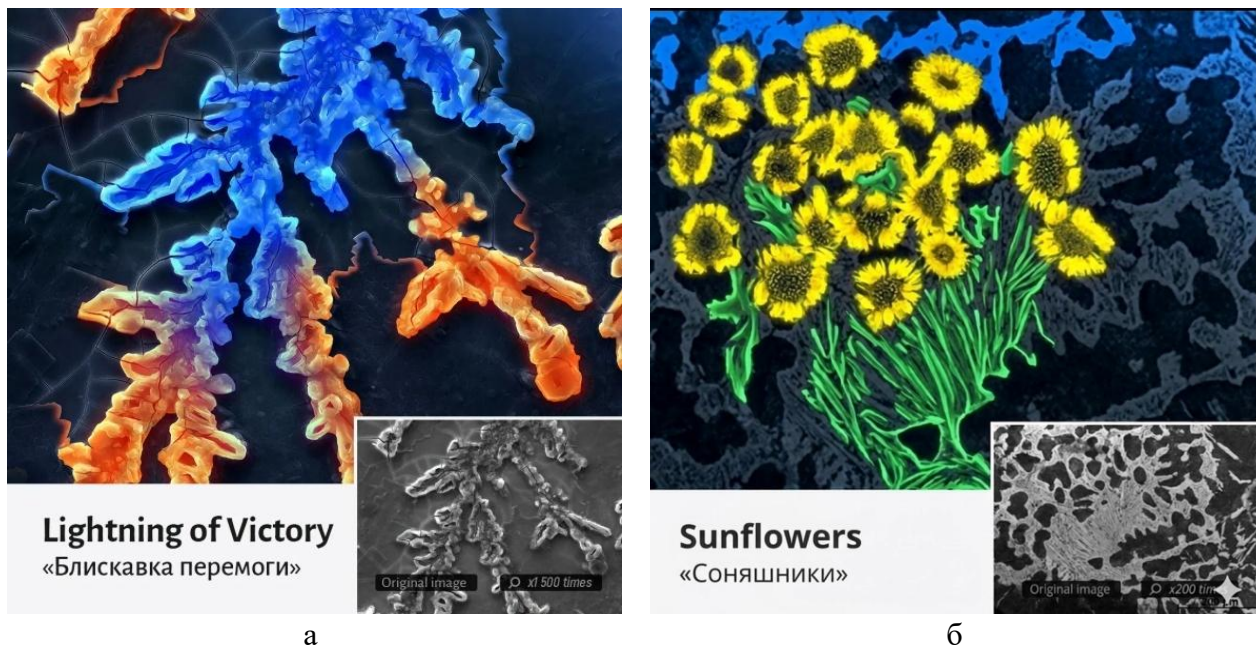


Рисунок 3 – Приклади зображень НаноАрт українських науковців: а – «Блискавка перемоги», Бердянський державний педагогічний університет [42]; б – «Соняшники», Запорізький національний університет та Національний університет «Запорізька політехніка» [43]

Отже, аналіз сучасних публікацій у сфері НаноАрт показує, що в якості об'єкту наукового дослідження та художньої візуалізації можуть бути різноманітні мікро- та наноструктури, що дає змогу розкрити естетичний потенціал невидимих фрагментів матеріального світу та поєднувати фундаментальні наукові дані з художньою експресією.

Водночас такий підхід сприяє **подальшому** поглибленню наукового розуміння структурних особливостей матеріалів і **суттєво** розширює можливості їх інтерпретації у контексті **сучасного** матеріалознавства.

Мета дослідження. Дослідити теоретичні та практичні засади синергії штучного інтелекту й матеріалознавства для створення візуалізацій зображень НаноАрт на основі структур металів і сплавів, визначити ефективність інтеграції генеративних алгоритмів у процес обробки мікроструктурних зображень та розробити рекомендації щодо їх раціонального використання із збереженням наукової достовірності.

Основний матеріал дослідження. Інтеграція ШІ у сферу матеріалознавства формує нові міждисциплінарні підходи до інтерпретації та візуалізації мікроструктур металів і сплавів. У цьому контексті особливий інтерес становить створення зображень НаноАрт, що поєднує науковий аналіз із цифровими технологіями генеративної обробки даних. З метою систематизації та порівняльного аналізу можливостей зазначених підходів доцільним є узагальнення їх функціональних характеристик і практичної результативності.

Узагальнені данні ефективності різних цифрових інструментів для створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів представлені в таблиці 1. Аналіз представлених даних таблиці 1 свідчить про те, що визначення оптимальної технології цифрової обробки зображень наноструктур є детермінованим і залежить від кінцевої мети дослідження або творчого проєкту:

Таблиця 1 – Порівняння ефективності цифрових інструментів для створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів

№ п/п	Параметр	Цифрові інструменти			
		Графічні редактори	3D-моделювання	Спеціалізований софт для мікроскопії	AI-генератори
1	Час створення	Від кількох годин до днів на ретельне розфарбовування.	Тривалий процес через необхідність побудови топології за знімком.	Мінімальний, оскільки обробка відбувається в реальному часі або відразу після зйомки.	Секунди або хвилини на генерацію/стилізацію.
2	Гнучкість	Висока у плані корекції кольору та нашарування ефектів.	Максимальна у зміні освітлення та ракурсів «металевої» сцени.	Низька, обмежена інструментами математичного аналізу поверхні.	Висока у варіативності стилів, але важко контролювати деталі.
3	Передача кольорів	Повністю суб'єктивна, художня інтерпретація автора.	Базується на фізично коректному рендерингу (PBR) металів.	Псевдоколювання на основі інтенсивності сигналу або висоти рельєфу.	Залежить від тренувальних даних та промпту.
4	Складність використання	Середня, потребує навичок цифрового малювання.	Висока, вимагає знання принципів тривимірної геометрії.	Потребує спеціальної технічної підготовки оператора мікроскопа.	Низька, достатньо текстового запиту або базового зображення.
5	Рівень деталізації	Обмежений роздільною здатністю вихідного мікрознімка.	Залежить від кількості полігонів у моделі структури.	Найвищий (атомно-молекулярний рівень), фіксує реальну текстуру металу.	Висока візуальна деталізація, яка може бути ілюзорною («артефакти»).
6	Реалістичність зображення	Висока художня реалістичність.	Фотореалістична імітація фізичних властивостей сплавів.	Документальна точність (відображення реальної наноструктури).	Гіперреалістична, але часто науково недостовірна.
7	Можливості масштабування	Обмежені піксельною сіткою (растром).	Необмежені (векторна природа 3D-об'єктів).	Обмежені технічними характеристиками лінз та детекторів.	Висока завдяки вбудованим алгоритмам апскейлінгу.
8	Рівень автоматизації процесу	Низький, переважно ручна праця.	Середній (використання процедурних текстур).	Високий у частині збору та первинної фільтрації даних.	Максимальний, процес майже повністю автономний.
9	Можливості інтеграції з іншими технологіями	Добре інтегрується з будь-якими медіа-форматами.	Можливість експорту для VR/AR візуалізацій структур.	Інтеграція з базами даних кристалографії та CAD-системами.	Можливість використання як плагіна в графічних редакторах.
10	Доступність для користувача	Загальнодоступне програмне забезпечення (ПЗ). Є безкоштовні аналоги.	Доступно (Blender безкоштовний), але високий поріг входу.	Низька, ПЗ часто прив'язане до дорогого обладнання (SEM/AFM).	Висока, через хмарні сервіси та відкриті моделі.
11	Вартість	Від безкоштовних варіантів до підписки (\$20-50/міс).	ПЗ безкоштовне, але потребує потужного апаратного забезпечення.	Дуже висока (входить у вартість мікроскопа - сотні тисяч доларів).	Від безкоштовних лімітів до платних API-запитів.

– за критерієм наукової достовірності та прецизійності, безумовне лідерство належить

спеціалізованому софту для мікроскопії (Gwyddion, MountainsMap, ImageJ (Fiji), SmartSEM/Velox та інші), оскільки лише він забезпечує документальну точність передачі морфології структур металів та сплавів на нанорівні.

– у контексті художньої виразності та гнучкості маніпуляцій, найбільш ефективними є графічні редактори (Adobe Photoshop, GIMP або Affinity Photo), які дозволяють автору здійснювати повний контроль над колористикою та композицією.

– з точки зору технологічного прогресу та швидкості обробки, домінують AI-генератори (Midjourney, Stable Diffusion, DALL-E 3 (інтегрований у ChatGPT), Adobe Firefly (вбудований у Photoshop), Gemini (модель Nano Banana/3 Flash)), що демонструють найвищий рівень автоматизації, тоді як 3D-моделювання (Blender, Maya) є оптимальним для задач інтерактивного масштабування та створення об'ємних симуляцій.

На основі узагальнення практичного досвіду застосування технологій штучного інтелекту у процесі створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів і сплавів було визначено та систематизовано їх основні переваги:

1. Інтелектуальне масштабування та реставрація (Upscaling).

Використання нейронного відновлення зображень дозволяє підвищувати роздільну здатність мікроструктур, ефективно усуваючи цифрові шуми та артефакти. Це забезпечує точне відтворення дрібних елементів нанорельєфу та дає «друге життя» старим зображенням структур матеріалів.

Так, наприклад, під час покращення якості зображення мікроструктури сформованого шару термітного сплаву на основі хрому, отриманого методом самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС) (рис. 4а), за допомогою алгоритмів генеративного штучного інтелекту (зокрема моделі Gemini 3) спостерігається підвищення чіткості, деталізації та контрастності зображення (рис. 4б). Відновлене зображення характеризується кращою візуалізацією структурних елементів, тоді як початкове зображення має ознаки розмитості та нижчу насиченість кольорів.

З використанням моделі ChatGPT5.2 зображення мікроструктури трубної заготовки сталі 15Х1М1Ф (рис. 4в) стає більш чітким, оскільки прибираються оптичні шуми, артефакти розфокусування та надлишкова зернистість фону (рис. 4д).

Використання штучного інтелекту для реставрації архівних мікрофотографій та знімків структур матеріалів (рис. 4е) відкриває нові можливості для матеріалознавства: це не просто «косметичний ремонт» зображення (рис. 4ж), а інструмент відновлення втрачених наукових даних.

2. Висока швидкість генерації та автоматизація обробки.

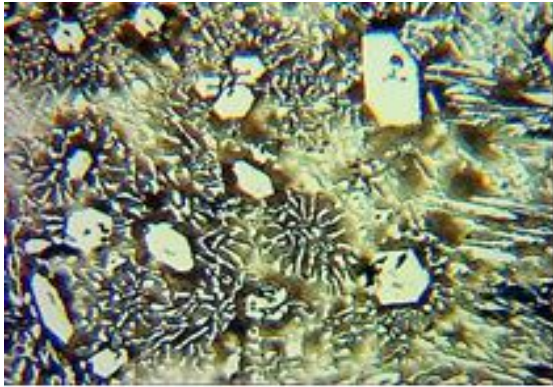
Штучний інтелект дозволяє обробляти складні мікроскопічні структури (SEM, TEM, AFM) за лічені хвилини. Це мінімізує вплив людського фактора та значно прискорює цикл наукових досліджень, перетворюючи рутинну роботу на динамічний творчий процес.

Так, безпосередньо чорно-білий знімок мікроструктури сірого чавуну з пластинчастим графітом, отриманий методом електронної мікроскопії (рис. 5а), після обробки сучасними цифровими інструментами (за допомогою графічного редактора Adobe Photoshop та AI-генераторів – моделей ChatGPT і Gemini) проходить етапи усунення шумів і дефектів зображення, структурної деталізації, цифрового підвищення контрастності та візуальної трансформації, у результаті чого набуває ознак художнього образу НаноАрт «Колібрі» (рис. 5б – рис. 5е). Колібрі як найменший птах на планеті в зображенні НаноАрт уособлює мікроскопічний масштаб структурних елементів матеріалу, підкреслюючи складність, витонченість і приховану енергію мікросвіту металів і сплавів.

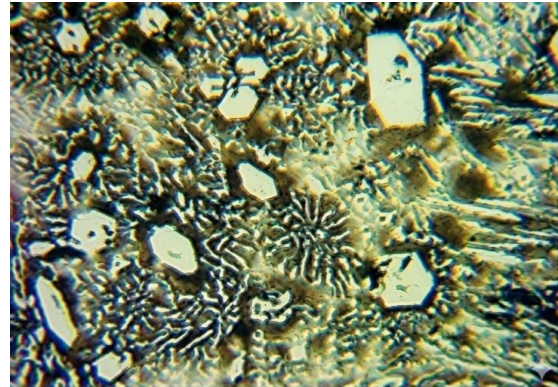
3. Можливість експериментувати зі стилями та візуалізацією.

AI-генератори дають змогу застосовувати широкий спектр візуальних стилізацій

зображень (наприклад, в 3D стилі, у стилі LEGO, порцеляновому стилі, в'язаному стилі, стилі пазлів та інших), підкреслюючи унікальну форму та морфологію об'єктів. Це дозволяє адаптувати науковий контент під різні формати – від академічних презентацій до виставок сучасного мистецтва.



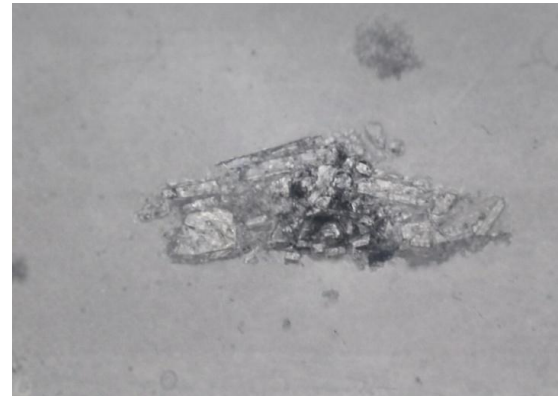
а



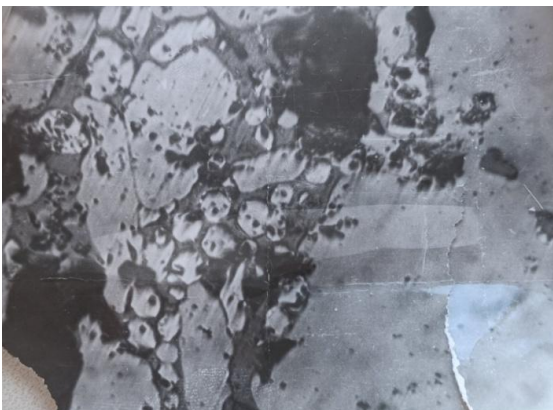
б



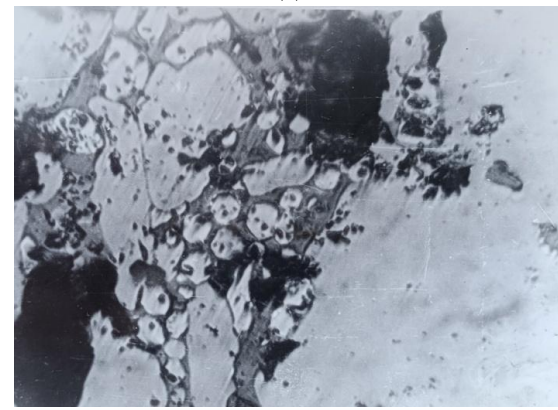
в



д



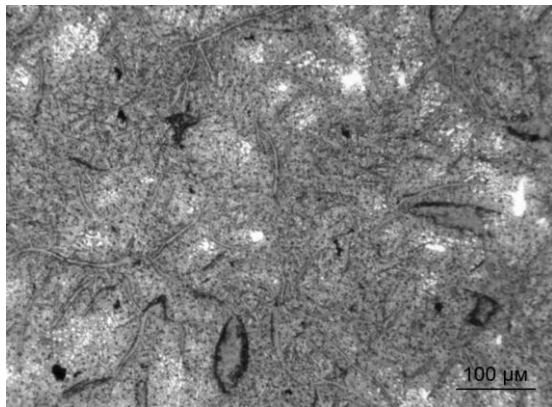
е



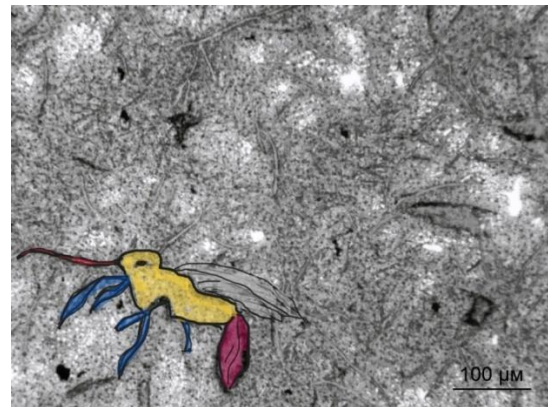
ж

Рисунок 4 – Механізм покращення якості зображень старих мікроструктур металів і сплавів із застосуванням інтелектуальних систем на основі штучного інтелекту:

а, б – мікроструктура формування шару термітного сплаву на основі хрому при СВС-процесі (зразок з травленням) [46] до та після покращення якості за допомогою моделі Gemini 3; в, д – мікроструктури трубної заготовки сталі 15X1M1Ф до та після покращення якості за допомогою моделі ChatGPT5.2; е, ж – мікроструктура високохромистого чавуну в литому стані до та після реставрації за допомогою моделі Gemini 3



а



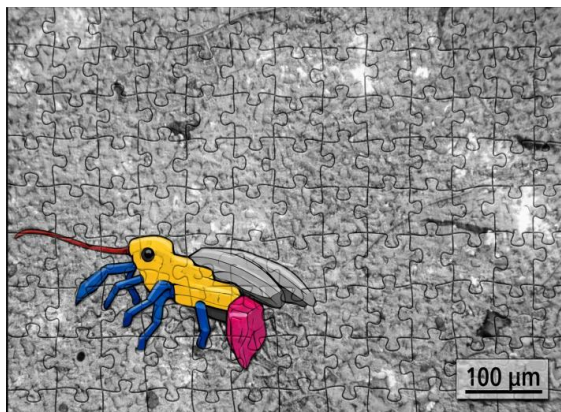
б



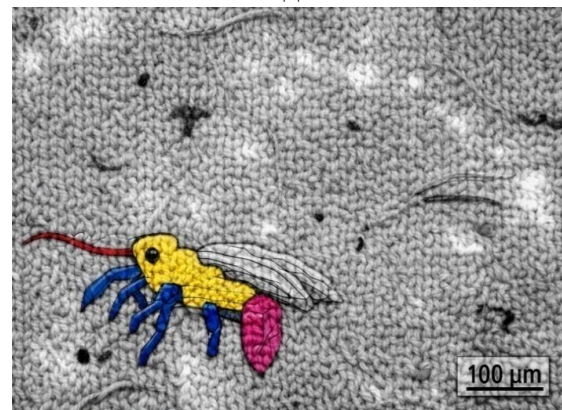
в



д



е



ж

Рисунок 5 – НаноАрт «Колібрі»: а – вихідна мікроструктура сірого чавуну з пластинчастим графітом; б – НаноАрт, створений за допомогою графічного редактора Adobe Photoshop; в – НаноАрт, створений за допомогою Gemini 3; д – НаноАрт, створений в стилі 3D за допомогою моделі ChatGPT5.2; е – НаноАрт, створений в стилі пазлів за допомогою моделі Gemini 3; ж – НаноАрт, створений у в'язаному стилі за допомогою моделі Gemini 3

Застосування 3D-ефектів, об'ємного моделювання та світлотіньових акцентів у межах концепції НаноАрт трансформує пласку мікроструктурну схему у візуально відчутний просторовий образ (рис. 5г). Гармонійно підібрана кольорова гама, асоційована з яскравим оперенням колібрі, підсилює художню виразність композиції та формує ефект нано-скульптури, надаючи зображенню статусу унікального цифрового експоната.

Візуальна стилізація у форматі пазлів (рис. 5д) створює відчуття мозаїчної цілісності та

композиційної взаємозалежності елементів, де кожен фрагмент виступає окремою структурною складовою, що органічно інтегрується у загальну систему зображення. Такий підхід формує уявлення про складний об'єкт як про сукупність взаємопов'язаних частин, які, поєднуючись, утворюють завершену візуальну конфігурацію. Крім того, використання естетики пазлів підкреслює багаторівневу організацію структури об'єкта, створюючи візуальну метафору складності, взаємозв'язку та гармонійної взаємодії між науковим пізнанням і художнім осмисленням.

Створення НаноАрту у в'язаному стилі (рис. 5e) дозволяє інтерпретувати мікроструктуру матеріалу як систему взаємопов'язаних «ниткоподібних» елементів, що

формують цілісне структурне полотно, поєднуючи наукову візуалізацію складних морфологічних особливостей із художньою метафорою взаємодії та безперервності структурних компонентів.

4. Сприяння розвитку креативного та критичного мислення.

Процес створення НаноАрту стимулює пошук нових візуальних метафор у матеріалознавстві. Водночас це розвиває навички верифікації даних, адже дослідник повинен постійно оцінювати достовірність згенерованих результатів, щоб художня обробка не викривила наукову суть структури.

Застосування технологій штучного інтелекту у створенні зображень НаноАрт супроводжується також і сукупністю проблем і обмежень, що потребують системного аналізу та врахування, особливо в межах освітньої діяльності та науково-мистецькому контексті:

1. Обмежена наукова точність та ризик викривлення.

Згенеровані зображення не завжди відповідають реальним фізичним та хімічним властивостям наноструктур. Це призводить до спотвореного уявлення про об'єкти, особливо коли алгоритми створюють недостовірні інтерпретації (артефакти генерації), додаючи неіснуючі деталі або ігноруючи реальні пропорції та масштаби зображення.

2. Обмежений контроль над мікродеталізацією

Більшість сучасних генеративних моделей оперують художніми стилями в цілому, не дозволяючи досліднику здійснювати прецизійне (точкове) керування окремими елементами структури. Це призводить до того, що під час стилізації специфічні фази металів чи сплавів (наприклад, голчасті чи пластинчасті структури) можуть бути помилково згладжені або викривлені. У професійному НаноАрті це є критичним недоліком, оскільки втрачається ідентифікація конкретного матеріалу, а художня обробка починає суперечити його фізичній морфології.

3. Ризик надмірної художньої стилізації.

Використання популярних візуальних стилізацій зображень несе ризик надмірної художньої обробки. Без належного балансу між естетикою та достовірністю наукова цінність мікроснімка нівелюється, перетворюючи його на суто декоративний елемент.

Наприклад, художня стилізація НаноАрт «Колібри» у стилі кіберпанк (рис. 6a) ускладнює сприйняття основної ідеї створення НаноАрт на основі структур металів та сплавів, відбувається «загубленість» концепту, тобто ставить акцент на ефектності, а не на смислі зображення. Унаслідок цього наукова складова зображення відходить на другий план, тоді як домінуючим стає декоративний візуальний ефект.

В свою чергу надмірна стилізація (рис. 6b) викривлює сприйняття реальних об'єктів мікросвіту, перетворюючи їх на декоративні елементи. Якщо на оригінальному мікроснімку (рис. 5a) колір та текстура фаз відображали їхній хімічний склад та фазовий стан, то тут вони замінені на яскраві, неприродні відтінки та спрощені форми. Порушення масштабів та ігнорування метричних параметрів спотворює просторове уявлення про справжні розміри структурних складових зображення. Така художня інтерпретація позбавляє зображення

інформативності та може призвести до невірних висновків про морфологію та фазовий склад матеріалу.

4. Питання авторського права та етики.

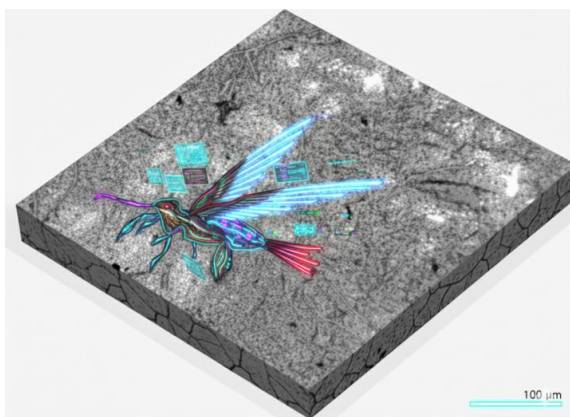
Гостро постають питання авторського права, прозорості використання навчальних даних та коректного зазначення внеску людини і ШІ. Крім того, технічні обмеження платформ щодо роздільної здатності, форматів експорту та можливостей подальшого редагування часто стають на заваді отриманню професійного результату.

5. Залежність від компетенцій користувача (Prompt Engineering).

Якість кінцевого результату залежить від майстерності формулювання промпту (стиль, колір, ефекти, мета). Це вимагає від дослідника додаткових навичок цифрової грамотності, без яких ефективно використання ШІ неможливе.

6. Освітні та когнітивні ризики.

Неконтрольоване використання AI-генераторів створює загрозу зниження рівня аналітичного мислення та творчої самостійності користувача, замінюючи глибоке дослідження морфології поверхневим генеративним підбором варіантів.



а



б

Рисунок 6 – НаноАрт «Колібрі», створений з надмірною художньою стилізацією:
а – НаноАрт, створений у стилі кіберпанк в 3D-ізометрії за допомогою моделі Gemini 3;
б – НаноАрт, створений в стилі 3D за допомогою моделі ChatGPT5.2

Отже, НаноАрт на основі структур металів та сплавів є перспективним інструментом візуалізації, який дозволяє трансформувати складні мікроструктурні зображення у виразні художні образи. Проте для збереження наукової достовірності дослідникам-матеріалознавцям рекомендується дотримуватися концепції помірної стилізації, де художні засоби (колірна сегментація, вітражна техніка) спрямовані на акцентування морфології фаз та топології міжзеренних меж без спотворення їхньої геометрії. Встановлено, що надмірна стилізація формує у глядача уявлення про зображення як про продукт цифрового дизайну, а не як про візуалізацію реальних мікроструктур, сформованих у процесі кристалізації та фазових перетворень у металах і сплавах. Така інтерпретація послаблює пізнавальну цінність НаноАрт і знижує його роль як засобу популяризації матеріалознавства, адже наукова основа зображення втрачає свою очевидність для спостерігача. У зв'язку з цим рекомендується раціональне використання технологій штучного інтелекту для створення та обробки зображень НаноАрт, спрямоване на дотримання академічної доброчесності, розвитку цифрових компетентностей та забезпечення наукової достовірності результатів освітньої діяльності.

Перспективи подальших досліджень включають розробку методів застосування

штучного інтелекту для автоматизованого відновлення архівних фотографій мікроструктур металів та сплавів, створення алгоритмів художньої інтерпретації наноструктур на основі даних електронної мікроскопії, а також формування цифрових платформ і баз даних для зберігання та аналізу зображень НаноАрт.

ВИСНОВКИ

Використання цифрових технологій є невід'ємним етапом у процесі створення зображень НаноАрт, оскільки вони дозволяють точно відтворювати наноструктури та складні деталі, які недоступні для спостереження неозброєним оком. Ці інструменти забезпечують ефективну обробку наукових даних, моделювання текстур і кольорових композицій, а також відкривають широкі можливості для творчого експериментування. Завдяки цифровій візуалізації НаноАрт поєднує наукову точність із художньою уявою, створюючи високоякісні та інноваційні образи. Крім того, застосування таких технологій сприяє популяризації науки, дозволяючи глядачам усвідомити красу та складність невидимого світу атомів і молекул.

На основі комплексного аналізу виявлених переваг і недоліків застосування технологій штучного інтелекту у процесі створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів та сплавів сформульовано науково обґрунтовані рекомендації щодо їх етичного та раціонального використання, орієнтовані на забезпечення принципів академічної доброчесності, розвиток цифрових компетентностей та досягнення наукової достовірності результатів освітньої діяльності.

Сучасні генеративні системи штучного інтелекту (зокрема моделі ChatGPT та Gemini) надають можливість здійснювати автоматизований аналіз та покращення мікро- і нанозображення металів та сплавів, а також реставрацію архівних знімків мікроструктур металів і сплавів, підвищуючи їхню деталізацію, контрастність і художню виразність, що сприяє більш ефективній комунікації наукових даних і створенню естетично виразних візуальних образів мікросвіту.

Можливість експериментування з різними художніми стилями та способами візуалізації (наприклад, створювати зображення в 3D-стилі, у стилі LEGO, порцеляновому стилі, в'язаному стилі, стилі пазлів та інших) відкриває нові підходи до художньої інтерпретації мікро- та наноструктур матеріалів. Такий підхід підсилює візуальну виразність наукових зображень і водночас розширює можливості популяризації наукових результатів шляхом інтеграції елементів науки, цифрового мистецтва та сучасних інформаційних технологій.

Синергія штучного інтелекту та матеріалознавства відкриває нові міждисциплінарні можливості для створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів і сплавів, поєднуючи наукову достовірність мікроструктурного аналізу з інструментами цифрової візуалізації та генеративного моделювання. Використання алгоритмів штучного інтелекту дає змогу здійснювати обробку, інтерпретацію та художню трансформацію зображень реальних металографічних структур без втрати їх фізичної сутності, що сприяє популяризації матеріалознавства та формуванню нового формату представлення наукових результатів.

Список використаних джерел

1. Shargorodskiy S.A. Comparative analysis of the implementation of information technologies in higher education institutions of the Czech Republic and Ukraine / S.A. Shargorodskiy // Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal. – 2025. – No. 38. – pp. 165–175. –

<http://doi.org/10.47451/tec2025-09-05>

2. Левківська Л.В. Використання інформаційних технологій у вищій школі / Л.В. Левківська, С.А. Левківський // Наукові записки Малої академії наук України. – 2024. – №1(29). – С. 57–66. – <http://doi.org/10.51707/2618-0529-2024-29-07>

3. Варава І.М. Особливості науково-дослідницької діяльності студентів як суб'єктів вищої освіти / І.М. Варава // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. – 2018. – Вип. 52. – С. 247–250. – http://nbuv.gov.ua/UJRN/mitimpt_2018_52_60

4. Computational Technologies in Materials Science / Edited By S. Tayal, P. Singla, A. Nandi, J.P. Davim. 1st Edition. – 2021. – CRC Press. – 250 p. – <https://doi.org/10.1201/9781003121954>. – ISBN 9780367640583

5. Digitalisation of material science – Improving product design in the context of Industry 4.0 / Pascoal-Faria P., da Silva D.P., Mateus A., Mitchell G.R. // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.237>

6. Цифровізація матеріалознавства й напрями використання штучного інтелекту / Ю.Г. Ковальов, В.В. Аулін, С.Г. Ковальов та ін. // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2025. – №. 111. – С. 67–74. – <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.67>

7. Штучний інтелект у матеріалознавчих дослідженнях: тенденції, інструменти та трансформації / Ю.Г. Ковальов, В.В. Аулін, С.Г. Ковальов та ін. // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2025. – Вип. 12(43). – Ч. II. – С. 134–141. – [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)

8. Пашинська О.Г. Штучний інтелект у матеріалознавстві: зміни у відкритті та розробці матеріалів / О.Г. Пашинська, А.В. Завдовесєв // Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. – 2025. – № 5. – С. 152–164. – <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-17>

9. Абрамович А.О. Застосування штучного інтелекту для ідентифікації металів вихрострумовою системою / А.О. Абрамович, Є.О. Зайцев, В.О. Піддубний // Scientific Collection «InterConf+». Theory and Practice of Science: Key Aspects: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference (July 19–20, 2023, Rome, Italy). – 2023. – № 35(163). – С. 287–298. – <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.07.2023.028>

10. Dimiduk D.M. Perspectives on the Impact of Machine Learning, Deep Learning, and Artificial Intelligence on Materials, Processes, and Structures Engineering / D.M. Dimiduk, E.A. Holm, S.R. Niezgodna // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2018. – Vol. 7. – pp. 157–172. – <https://doi.org/10.1007/s40192-018-0117-8>

11. Goswami L. Artificial Intelligence in Material Engineering: A Review on Applications of Artificial Intelligence in Material Engineering / L. Goswami, M.K. Deka, M. Roy // *Advanced Engineering Materials* (11 April 2023). – 2023. – Vol. 25. – Issue 13. – <https://doi.org/10.1002/adem.202300104>

12. Artificial intelligence: A powerful paradigm for scientific research / Y. Xu, X. Liu, X. Cao et al. // The Innovation. – 2021. – Vol. 2. – Issue 4. – 100179. – <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100179>

13. Exploring Elastoplastic Constitutive Law of Microstructured Materials Through Artificial Neural Network – A Mechanistic-Based Data-Driven Approach / H. Yang, H. Qiu, Q. Xiang et al. // Journal of Applied Mechanics. – 2020. – Vol. 87. – Issue 9. – <https://doi.org/10.1115/1.4047208>

14. Wang K. Meta-modeling game for deriving theory-consistent, microstructure-based traction–separation laws via deep reinforcement learning / K. Wang, W. Sun // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2019. – Vol. 346. – pp. 216–241. –

<https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.026>

15. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials / Guo K., Yang Z., Yu C.-H., Buehler M.J. // *Materials Horizons*. – 2021. – No. 8. – pp. 1153–1172. – <https://doi.org/10.1039/d0mh01451f>

16. Kumar A. Recent progresses on high entropy alloy development using machine learning: A review / A. Kumar, N.K. Mukhopadhyay, T.P. Yada // *Computational Materials Today*. – 2025. – Vol. 8. – 100038. – <https://doi.org/10.1016/j.commt.2025.100038>

17. When Machine Learning Meets 2D Materials: A Review / B. Lu, Y. Xia, Y. Ren et al. // *Advanced Science*. Open Asses. – 2024. – Vol. 11. – Issue 13. – 2305277. – <https://doi.org/10.1002/advs.202305277>

18. Artificial intelligence can recognize metallic glasses in vast compositional space with sparse data / W. Xie, Y. Sun, C. Wang et al. // *npj Computational Materials*. – 2025. – Vol. 11. – 254. – <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01753-9>

19. Divide and conquer: Machine learning accelerated design of lead-free solder alloys with high strength and high ductility / Q. Wei, B. Cao, H. Yuan et al. // *npj Computational Materials*. – 2023. – Vol. 9. – Article number 201. – <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01150-0>

20. AI-Driven Inverse Design of Materials: Past, Present, and Future / X.-Q. Han, X.-D. Wang, M.-Y. Xu et al. // *Chinese Physics Letters*. – 2025. – Vol. 42. – No. 2. – <https://doi.org/10.1088/0256-307X/42/2/027403>

21. Alloy design integrating natural language processing and machine learning: breakthrough development of low-cost, high-performance Ni-based single-crystal super alloys / J. Yao, Z. Wang, J. Wang et al. // *npj Computational Materials*. – 2026. – Vol. 12. – Article number 38. – <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01906-w>

22. Wang Y. Applications of Artificial Intelligence / Machine Learning to High-1 Performance Composites / Y. Wang, K. Wang, C. Zhang // *Composites. Part B: Engineering*. – 2024. – Vol. 285. – 111740. – <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111740>

23. Artificial Intelligence for High-Throughput Discovery of Topological Insulators : the Example of Alloyed Tetradymites / G. Cao, R. Ouyang, L.M. Ghiringhelli et al. // *Physical Review Materials*. – 2020. – No. 4. – 034204. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.034204>

24. Machine learning–driven thermoelectric materials: Review on prediction, optimization, and discovery / X. Zhang, X. Wang, W. Wang et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2026. – Vol. 1050. – 185711. – <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.185711>

25. Deep learning-based superconductivity prediction and experimental tests / D. Kaplan, A. Zheng, J. Blawat et al. // *Eur. Phys. J. Plus*. 2025. – Vol. 140. – No. 58. – <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05947-w>

26. Application of machine learning in magnetocaloric materials: A review / W. Mo, J. Wang, G. Yuan et al. // *Materials Today Communications*. – 2025. – Vol. 44. – 111933. – <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111933>

27. Xie E., Yang C. AI Design for High Entropy Alloys: Progress, Challenges and Future Prospects / E. Xie, C. Yang // *Metals*. – 2025. – No.15. – 1012. – <https://doi.org/10.3390/met15091012>

28. Vergara D. A Decade of Digital Twins in Materials Science and Engineering / D. Vergara, A. del Bosque, P. Fernández-Arias // *Computers, Materials and Continua*. – 2025. – Vol. 85. – Issue 1. – pp. 41–64. – <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.067881>

29. NanoArt Winners [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unam.bilkent.edu.tr/en/nanoart/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

30. NanoArt. International Festivals, NanoArt Online Competitions, Art - Science - Technology Conferences, NanoArt 21 Exhibitions [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://nanoart21.org/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

31. Academy of NanoArt. NanoArt Programs, Educational NanoArt Events, NanoArt Online Galleries, 3D Museum of NanoArt [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nanoart.org/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

32. The 1st International Festival of NanoArt - Finland 2007: Art and Nanotechnology - Part I [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nanotech-now.com/columns/?article=067> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

33. NanoArtography [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nanoartography.org/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

34. NanoArtography 2024 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nanoartography.org/2024> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

35. Science as Art Backgrounds [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mrs.org/programs/get-involved/science-as-art/science-as-art-zoom-backgrounds> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

36. Science to art...for the microscopic world enthusiast [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://m.gemologyonline.com/Forum/phpBB2/viewtopic.php?t=13296> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

37. NanoArt K12 International Online Competition [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nanoart21.org/nanoart-k12-international-online-competition/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

38. NanoArt K12 Gallery [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nanoart.org/nanoart-k12-gallery/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

39. MVC14. 14th ANNUAL MATERIALS VISUALIZATION COMPETITION 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.matse.psu.edu/mvc14> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

40. MVC14 Final Entries [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.matse.psu.edu/mvc14-final-entries> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

41. Suchikova Y. Rethinking the Goals and Values of Nanoart During the War: an Artists' Statement / Y. Suchikova, S. Kovachov // *NanoEthics*. – 2023. – Vol. 17. – article number 12. <https://doi.org/10.1007/s11569-023-00447-0>

42. «Бердянські медузи», «Вулкан», «Україна». Сергій Ковачов і Яна Сичікова в світовому топі Наноарта (фото) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.brd24.com/news/berdyanski-meduzi-vulkan-ukraina-sergiy-kovachov-i-yana-sychikova-v-svitovomu-topi-nanoarta-foto.html> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

43. Воденнікова О.С. НаноАрт та металургія: симбіоз мистецтва та нанотехнологій під час війни / О.С. Воденнікова, С.А. Воденніков, К.А. Піщенко // *Метал та лиття України*. – 2025. – Т. 33. – № 3–4 (342–343). – С. 53–63. – <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.053>.

44. Воденнікова О.С. НаноАрт та металургія: використання інформаційних технологій при обробці мікро-та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів / О.С. Воденнікова, С.А. Воденніков, К.А. Піщенко // *Наука та виробництво*. – 2025. – № 30. – С. 69–80. – <https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347069>

45. Воденнікова О.С. НаноАрт та металургія: використання штучного інтелекту для обробки структур металів та сплавів / О.С. Воденнікова, С.А. Воденніков // *Метал та лиття України*. – 2026. – Т. 34. – № 1 (344). – С. 55–64. <https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.055>

46. Аналіз структурно-хімічного стану формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці самопоширюваним високотемпературним синтезом / І.Е. Скідін, Б.Ф. Белов, О.С. Воденнікова та ін. // *Метал та лиття України*. – 2020. – Том 28. – №4. – С. 69–75.

Vodennikova O.S., Vodennikov S.A., Pishchenko K.A.

SYNERGY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MATERIALS SCIENCE IN THE CREATION OF NANOART IMAGES: PROSPECTS, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES

The use of artificial intelligence (AI) in materials science opens new opportunities for the analysis of material microstructures, automated recognition of phase components, prediction of material properties, and improvement of the quality of microscopic images. The application of such AI technologies offers several advantages, including increased accuracy and objectivity of analysis, reduced data processing time, minimization of human factor influence, and efficient processing of large volumes of information.

At the same time, modern digital technologies and image processing methods create new opportunities for the development of the NanoArt field, which combines scientific visualization of nanostructures with the artistic interpretation of obtained images. Within this field, the recurrence of forms in nature becomes particularly evident: structures that exist at the atomic and molecular levels often reproduce the contours of landscapes, living organisms, cosmic objects, still lifes, or other objects of the material world, demonstrating the universality of natural patterns.

Modern AI generators (such as the ChatGPT and Gemini models) enable automated analysis and enhancement of micro- and nano-images, improving their level of detail, contrast, and artistic expressiveness. This contributes to more effective communication of scientific data and to the creation of aesthetically expressive visual representations of the microworld.

The possibility of experimenting with styles and visualization (for example, creating images in 3D style, LEGO style, porcelain style, knitted style, puzzle style, and others) reveals new approaches to the artistic interpretation of micro- and nanostructures of materials, enhances the visual expressiveness of images, and expands opportunities for popularizing scientific results through the integration of science, digital art, and modern technologies.

Despite the significant potential of AI for creating NanoArt images, researchers face a number of challenges and limitations, including limited scientific accuracy and the risk of data distortion, insufficient control over micro-level detailing, the possibility of excessive artistic stylization, dependence on the author's competencies, educational and cognitive risks, as well as copyright issues and ethical aspects related to the use of AI in the context of NanoArt image creation.

Thus, the synergy of artificial intelligence and materials science forms a new interdisciplinary approach to the creation of NanoArt, combining algorithmic methods of image analysis and generation with the control of material structure and properties at the nanoscale.

Keywords: *materials science, structure of metals and alloys, digitalization, digital metallography, artificial intelligence, AI tools, NanoArt, image stylization.*

Стаття надійшла 08.04.2026р.

Стаття прийнята 10.04.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.