№ 2(46) 2026



НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА

ISSN 1993-9868 print
ISSN 2415-3109 online

https://nge.nung.edu.ua

Прийнято 21.07.2026. Прорецензовано 13.10.2026. Опубліковано 30.11.2026.

УДК 620.22:669.017.3:621.793:621.311.26 **DOI: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-238-251**

РОЗРОБКА АМОРФНИХ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Панчук М. В. *
Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-4898-2707
e-mail: ztk@nung.edu.ua

Криштопа Л. І.
Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-5274-0217
e-mail: liudmyla.kryshtopa@nung.edu.ua

Дейнега Р. О.
Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-1141-7672
e-mail: ruslan.deineha@nung.edu.ua

Николин У. М.
Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9111-1280
e-mail: uliana.nykolyn@nung.edu.ua

Панчук Т. М.
Викладач
Університет Короля Данила
вул. Євгена Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6118-1568
e-mail: panchuk773@gmail.com

Запропоноване посилання: Панчук, М. В., Криштопа, Л. І., Дейнега, Р. О., Николин, У. М. & Панчук, Т. М. (2026). Розробка аморфних металевих поверхонь для застосування в системах накопичення енергії. Нафтогазова енергетика, 2(46), 238-251. doi: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-238-251.

* Відповідальний автор

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. Електрохімічні системи накопичення енергії, включаючи батареї, паливні елементи та суперконденсатори, відіграють вирішальну роль у вирішенні проблеми невідповідності між виробництвом та споживанням енергії. Проте ці системи також мають низку недоліків, як от висока вартість, обмежений термін служби, втрати ємності, екологічні ризики та низька щільність енергії. Центральним викликом у вдосконаленні систем накопичення та зберігання енергії є дослідження впливу передових матеріалів, на обмеження та недоліки сучасних енергетичних систем. Серед різних систем, аморфні метали стали перспективним класом функціональних матеріалів для зберігання та перетворення енергії завдяки своїй невпорядкованій атомній структурі та унікальним міжфазним властивостям. В роботі досліджено як структурний безлад - співвідношення близького та середнього порядків впливає на ключові властивості: електронну структуру, іонний транспорт, каталітичну активність та механічну податливість. Виявлено, що налаштування розподілу щільно упакованих областей аморфних матеріалів збільшує пластичну деформацію від 2% до 8%, сприяючи однорідніщому розподілу зсуву. Наукова новизна отриманих результатів полягає у проведенні компаративного аналізу функціональних характеристик різних класів матеріалів, за результатами якого встановлено, що аморфні структури демонструють вищу електрохімічну активність, стабільність та ефективність накопичення енергії порівняно з їхніми кристалічними аналогами. Крім того, обґрунтовано переваги локальної архітектури матеріалу в енергетичних застосуваннях; доведено, що неоднорідність атомного масштабу безпосередньо керує процесами дифузії та кінетикою перебігу реакцій. На прикладах енергетичних застосувань продемонстровано, що функціональна продуктивність аморфних металів визначається не лише складом, але й розподілом, зв'язністю та еволюцією локальних атомних структур. Унікальна продуктивність аморфних металевих матеріалів виникає завдяки взаємодії між структурним безладом, налаштованим хімічним середовищем, та процесами, що домінують на інтерфейсі, які разом керують іонним транспортом, каталітичною активністю та механічною стабільністю. Таким чином, можна стверджувати, що аморфні металеві поверхні стали універсальною платформою для покращення продуктивності в широкому спектрі технологій перетворення та накопичення енергії.

Ключові слова: аморфні метали, ближній порядок, середній порядок, металеві скла, іонний транспорт, електрохімічні поверхні.

Вступ

Попит на енергію в різних сферах застосування — від промисловості до побутового сектору — стрімко зростає [1]. Цю тенденцію можна пояснити такими чинниками, як зростання чисельності населення, негативний вплив викопного палива на навколишнє середовище та збільшення залежності від цифрових технологій. З огляду на це, енергія, що виробляється з цих ресурсів, потребує ефективного зберігання для подальшого використання [2].

На сьогодні енергія, отримана з відновлюваних джерел, забезпечує попит у малих масштабах, але ще не покриває потреб великомасштабних промислових підприємств [3]. Завдяки здатності природно поповнювати свої запаси за короткий проміжок часу, відновлювані джерела можуть забезпечити екологічно безпечну заміну викопному паливу.

Сонячні теплові колектори та фотоелектричні (ФЕ) елементи – це технології для вилучення та перетворення сонячної енергії [4]. У той час як сонячні теплові системи використовують випромінювання для виробництва гарячої води або генерування електроенергії, фотоелектричні елементи безпосередньо перетворюють сонячне світло на електричну енергію.

У вітроенергетиці застосовують вітрові турбіни для перетворення кінетичної енергії повітряних мас на електричну [5]. Вітрові турбіни можуть бути встановлені на суші або в акваторіях морів (шельфі), а вітер є невичерпним та безкоштовним ресурсом. Вітрова енергетика ідеально підходить для масштабного виробництва електроенергії.

У гідроенергетиці електроенергія виробляється за рахунок використання енергії водного потоку. Найпоширенішими об'єктами гідроенергетики є річкові гідроелектростанції з греблями, а також припливно-відпливні енергетичні комплекси [6].

Геотермальна енергетика базується на використанні акумульованої в земній корі теплоти для виробництва теплової або електричної енергії [3].

Енергетика біомаси, з іншого боку, передбачає отримання тепла або електроенергії шляхом переробки органічних матеріалів, таких як деревина, відходи сільського господарства та промисловості. Окрім прямого спалювання, біомасу можна переробляти на біопаливо, таке як етанол або біодизель, або використовувати для отримання біогазу [2].

Перехід на відновлювані джерела енергії є важливим етапом для підвищення енергетичної безпеки, зменшення забруднення довкілля та боротьби зі зміною клімату. Однак, для широкого впровадження відновлюваної енергії необхідно вирішити такі проблеми, як непостійність (переривчастість) генерації, зберігання енергії та інтеграція з існуючими енергомережами [7].

Електрохімічні системи накопичення енергії, включаючи батареї, паливні елементи та супер конденсатори, відіграють вирішальну роль у вирішенні проблеми невідповідності між виробництвом та споживанням енергії [8]. Вони дозволяють акумулювати електроенергію для подальшого використання, забезпечуючи стабільність мережі, безперебійне живлення та інтеграцію відновлюваних джерел. Проте ці системи мають низку недоліків: високу вартість, обмежений термін служби, втратуємності, екологічні ризики та низьку щільність енергії [9].

Для ефективного проєктування високоефективних та надійних пристроїв, розуміння фундаментальних принципів різних електрохімічних методів та розкриття їхнього зв'язку між структурою та властивостями є своєчасними та мають вирішальне значення. Центральним викликом у вдосконаленні систем накопичення та зберігання енергії є дослідження впливу передових матеріалів, на подолання обмежень і недоліків сучасних енергетичних систем [10].

Кристалічні матеріали широко вивчалися завдяки їхнім чітко визначеним атомним структурам, вони часто демонструють анізотропні властивості, обмежену кількість активних центрів та структурну деградацію під час багаторазового циклування [11]. Ці обмеження спонукали до зростання інтересу до альтернативних матеріалів з підвищеною структурною гнучкістю та міжфазною функціональністю [12].

На даний час все більше уваги приділяється аморфним матеріалам. Серед різних систем, аморфні метали стали перспективним класом матеріалів для застосування в накопиченні енергії [13].

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень та публікацій.

21 століття ознаменувало початок епохи трансформації глобальних енергетичних систем, яка була спричинена нагальною потребою декарбонізації економіки, пом’якшення наслідків зміни клімату та переходу до сталого енергетичного інфраструктурного сектору. В основі цього переходу лежить ключовий технологічний фундамент – накопичення енергії [14].

Від забезпечення інтеграції переривчастих відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, до забезпечення електроенергією електромобілів, портативної електроніки та майбутніх електричних літаків – системи накопичення енергії є незамінними для досягнення вуглецево-нейтрального майбутнього [6].

Ефективна робота систем накопичення та зберігання енергії вимагає розробки та використання передових матеріалів з адаптованими структурними та міжфазними властивостями [15].

Дизайн матеріалу є ключовим фактором, що визначає продуктивність систем накопичення енергії, оскільки структура, склад та характеристики поверхні електродних матеріалів безпосередньо впливають на іонний транспорт, кінетику переносу заряду та міжфазну стабільність [16].

Серед різних систем аморфні метали стали перспективним класом матеріалів для застосування з метою накопичення енергії [13]. Відсутність далекого порядку призводить до високої щільності ненасичених координаційних центрів, ізотропної поведінки та унікальних електронних структур, що може підвищити електрохімічну активність та механічну стійкість [17].

Окрім об'ємних властивостей, особливо важливими є поверхневі та міжфазні характеристики цих матеріалів, оскільки електрохімічні реакції відбуваються здебільшого на межі розділу. Аморфні металеві поверхні мають чіткі переваги, включаючи однорідні енергетичні ландшафти [18], що робить їх дуже привабливими для покращення міжфазних процесів в електрохімічних пристроях.

Одночасно широкий спектр аморфних матеріалів, таких як оксиди, сульфіди та фосфати, були досліджені на предмет можливості застосування в накопиченні енергії, що продемонструвало покращену ємність, швидкісні характеристики та циклічну стабільність [19,20].

Незважаючи на те, що аморфні наноматеріали мають значний потенціал як нові матеріали з широкими перспективами застосування в багатьох напрямках електрохімічної галузі, їх розробка все ще перебуває на початковій стадії. Дослідження, зосереджені саме на аморфних металевих системах, залишаються порівняно фрагментарними та часто обмежуються окремими прикладами або конкретними сферами застосування. Як наслідок, наразі бракує комплексного розуміння взаємозв'язків «структура — властивості — характеристики», що визначають поведінку аморфних металевих поверхонь, особливо з точки зору міжфазної взаємодії.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Для систем зберігання та накопичення енергії в даний час характерні ряд недоліків, таких як висока вартість, обмежений термін служби, втрата ємності, екологічні ризики та низька щільність енергії. Покращення ефективності роботи цих систем є ключовим чинником для підвищення конкурентоспроможності енергетичних підприємств загалом. В роботі запропоновано усунути недоліки сучасних енергетичних систем за рахунок використання аморфних матеріалів.

Встановлено, що унікальна продуктивність аморфних металевих матеріалів виникає завдяки взаємодії між структурним безладом, налаштованим хімічним середовищем та процесами, що домінують на інтерфейсі, які разом керують іонним транспортом, каталітичною активністю та механічною стабільністю. Новизною роботи є проведене порівняння функціональних характеристик різних класів матеріалів та встановлення того, що аморфні структури володіють вищими значеннями електрохімічної активності, стабільності та ефективності накопичення порівняно з їхніми кристалічними аналогами. Крім того, доведено переваги локальної структури в енергетичних застосуваннях, де вона стає ще вираженішою, а неоднорідність атомного масштабу безпосередньо керує процесами транспортування та перебігом реакцій.

Завдяки своїм властивостям аморфні металеві матеріали можуть стати універсальною та об'єднуючою платформою для широкого спектру застосувань, пов'язаних з енергетикою, включаючи суперконденсатори, батареї, електрокаталітичні системи та пристрої сонячної енергії.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є проведення цілеспрямованого та системного аналізу аморфних металевих матеріалів з особливим акцентом на залежності їх функціональних характеристик від будови та структури, а також міжфазної поведінки в системах електрохімічного накопичення та перетворення енергії.

Крім того, завданнями є дослідити поточні проблеми технологій накопичення та збереження енергії, намітити шляхи їх вирішення та скерувати для раціонального проєктування енергетичних технологій наступного покоління.

Будова та структура аморфних матеріалів

З точки зору складу, аморфні металеві матеріали можна класифікувати на три основні категорії: одноелементні аморфні метали, аморфні сплави та аморфні сплави з високою ентропією [16]. Ця класифікація враховує ступінь зростання кількості елементів, що беруть участь у їх виготовленні.

Одноелементні аморфні метали мають найпростішу композиційну структуру, оскільки складаються з одного металевого елемента. Їхнє формування є досить складним процесом, оскільки чисті метали зазвичай демонструють високі швидкості зародження та росту кристалів під час охолодження, що сильно пригнічує склування [11].

Аморфні сплави – це багатокомпонентні металеві системи, що складаються з двох або більше елементів. Ці матеріали є найбільш вивченим класом аморфних металевих матеріалів [12]. Введення кількох елементів покращує склоутворювальну здатність за рахунок збільшення розмірної невідповідності атомів та хімічної складності, що пригнічує процеси кристалізації.

Високоентропійні аморфні сплави є хімічно найскладнішими аморфними системами та зазвичай складаються з п'яти або більше елементів у рівних або майже рівних атомних співвідношеннях; вони також демонструють низьку атомну рухливість та просторову гетерогенність.

Поєднуючи високу конфігураційну ентропію зі структурним безладом аморфного стану, ці матеріали відкривають розширені можливості для композиційного дизайну [17]. У таких системах повільна дифузія, сильні локальні структурні порушення та широка композиційна налаштовуваність сприяють стабілізації аморфної структури та забезпечують унікальні комбінації механічних, електрохімічних та каталітичних властивостей [18].

Хоча аморфні металеві матеріали не мають високого атомного порядку, їхнє розташування атомів не є повністю випадковим. Натомість їхня структура визначається чітко визначеним ближнім порядком (БП) та середнім порядком (СП) [21]. Ці локальні структури відіграють вирішальну роль у визначенні фізичних, хімічних та електрохімічних властивостей аморфних матеріалів.

Ближній порядок SRO стосується локальної атомної координації в межах першої оболонки найближчого сусіда, яка зазвичай простягається на одну-дві міжатомні відстані

2…5 Å. На цьому масштабі довжини атоми схильні організовуватися в енергетично вигідні конфігурації, що визначаються розміром атома, характеристиками зв'язків та електронними взаємодіями.

Як результат, локальні координаційні середовища в аморфних металах суттєво відрізняються від наявних у кристалічних аналогах. Цей ефект призводить до ширших розподілів довжин зв'язків та змінних координаційних чисел [22].

Загальноприйнятий опис БП базується на моделях щільної атомної упаковки, де атоми утворюють спотворені поліедричні кластери, а не періодичні одиниці решітки [23]. Серед них кластери, подібні до ікосаедричних, часто ідентифікуються як домінантні мотиви через їх високу ефективність упаковки та властиву геометричну фрустрацію, яка пригнічує кристалізацію.

Інші локальні конфігурації, такі як спотворені октаедри або двошарові поліедри, також можуть співіснувати, що залежить від складу та умов обробки [23].

Примітно, що одиниці БП не існують ізольовано, а просторово пов'язані між собою, що призводить до середнього порядку. СП описує організацію та кореляцію цих локальних кластерів на більших масштабах довжини, зазвичай від ≈0,5 до 2 нм. На відміну від кристалічного порядку, MRO не передбачає періодичності. Натомість він відображає необхідні топологічні розташування, такі як зв'язність кластерів та формування кластерних мереж.

Експериментальні та симуляційні дослідження показали, що така зв'язність призводить до появи структурних мотивів середнього порядку, включаючи ікосаедричні мережі та квазіеквівалентні конфігурації упаковки кластерів, які є важливими для розуміння структурної стабільності та транспортних властивостей в аморфних сплавах [23].

Співіснування БП та СП призводить до ієрархічної структурної організації, що характеризується просторовою гетерогенністю та топологічним безладом. У цій концепції БП визначає локальну атомну упаковку, тоді як СП керує тим, як ці одиниці розташовані та корелюють на протяжних атомних відстанях.

Така структурна ієрархія безпосередньо впливає на ключові властивості матеріалу, включаючи механічну міцність, шляхи дифузії, електронний транспорт та стійкість до кристалізації [24].

Функціональні характеристики аморфних металів

Останніми роками передові методи структурного аналізу (діагностики), такі як синхротронна рентгенографія, аналіз функції парного розподілу (PDF) та атомістичне моделювання, значно поглибили розуміння структур ближнього та середнього порядку в аморфних металах [25].

Незважаючи на ці досягнення, встановлення прямих та кількісних кореляцій між локальними атомними конфігураціями та макроскопічними характеристиками залишається досить складною проблемою. Такі складнощі можна пояснити внутрішньою гетерогенністю аморфних систем, де варіації координаційного середовища, довжини зав’язків та зв'язності кластерів породжують просторові коливання електронної структури, міцності зав’язків та вільного об'єму. Ці локальні варіації є не просто структурними особливостями. Вони визначають функціональні властивості матеріалів, керуючи механізмами деформації, хімічною стабільністю та шляхами реакцій, особливо на поверхнях та міжфазних інтерфейсах [26].

З точки зору механіки, вплив локальної атомної структури найвиразніше проявляється в об'ємних металевих склах, де пластична деформація локалізується у зонах зсувної трансформації (деформації). Активація цих зон істотно залежить від локальної щільності (ефективності) атомного пакування та ступеня структурної гетерогенності.

Автори [27] повідомляють, що налаштування розподілу щільно упакованих областей збільшує пластичну деформацію від 2% до 8%, що сприяє більш однорідному розподілу зсуву. Така поведінка відображає прямий зв'язок між структурою та властивостями, в якому БП та СП визначають просторовий розподіл механічно жорстких та податливих областей, і тим самим контролює шляхи деформації на атомному рівні.

Подібна структурна залежність спостерігається і для хімічної стабільності. У корозійностійких аморфних сплавах локальне атомне середовище диктує формування, склад та стабільність пасивних оксидних шарів. Наприклад, легвальні добавки, такі як тантал для об’ємного металевого скла на основі Zr, сприяють утворенню щільних оксидних плівок, зменшуючи густину струму корозії до одного порядку [28].

Навпаки, структурна релаксація або часткова кристалізація спричиняє виникнення хімічної та топологічної неоднорідності, яка

Таблиця 1 – Характеристики аморфних та кристалічних матеріалів для металів і сплавів [14,16, 30]

Характеристики	Аморфні матеріали	Кристалічні матеріали
електрохімічна активність	полегшена дифузія іонів завдяки "пухкій" структурі	обмежена дефектами кристалічної ґратки
стабільність	добре поглинають механічні напруги (менше тріщин)	руйнування (кришіння) анода вже після 10–50 циклів через розширення на 300%
ефективність накопичення	екстремально висока ємність (для Si анодів)	швидка втрата робочої ємності

Таблиця 2 – Характеристики аморфних та кристалічних матеріалів для оксидів металів [14,16, 31,32]

Характеристики	Аморфні матеріали	Кристалічні матеріали
електрохімічна активність	дуже висока за рахунок великої кількості активних центрів	обмежена лише доступною поверхнею та кристалічними гранями
стабільність	висока стійкість до деградації	швидка деградація через об'ємне розширення
ефективність накопичення	висока псевдоємність, відсутність фазових переходів	чіткі плато заряду/розряду, висока початкова ємність

створює переважні осередки (сайти) корозії [29]. Ці результати підкреслюють, що корозійна стійкість є не лише композиційним ефектом, а й фундаментально визначається стабільністю та однорідністю локальних атомних конфігурацій.

Порівняння функціональних характеристик аморфних та кристалічних матеріалів таких як електрохімічна активність, стабільність та ефективність накопичення для різних класів металів наведено в таблицях 1 і 2.

Наслідки локальної структури стають більш вираженими в енергетичних застосуваннях, де неоднорідність атомного масштабу безпосередньо керує процесами транспорту та реакцій.

Аморфні матеріали в пристроях перетворення та накопичення енергії

Аморфні металеві поверхні стали універсальною платформою для покращення продуктивності в широкому спектрі технологій перетворення та накопичення енергії. Їхня функціональна поведінка в практичних пристроях, побудована на взаємозв'язках структура-властивість та значною мірою визначається розподілом локального атомного середовища і результуючою однорідністю реакційних шляхів на поверхні.

У цьому контексті відсутність далекого порядку та результуюча хімічна однорідність на атомному рівні сприяють формуванню стабільніших та однорідніших інтерфейсів електрод-електроліт на ключових ділянках, де відбувається перенесення заряду під час роботи акумуляторів, конденсаторів, сенсорів та промислового електролізу.

Вказані особливості пом'якшують паразитні (побічні) реакції, що призводить до більш контрольованих міжфазних процесів [33]. Контроль побічних реакцій на межі розділу фаз дозволяє трансформувати деструктивні процеси в керовані електрохімічні стани. Цей принцип критично важливий для стабілізації сучасних хімічних джерел струму, каталізу та колоїдної хімії.

У системах накопичення енергії, зокрема в металево-анодних батареях аморфні поверхні сприяють більш однорідному потоку іонів та пригнічують локалізоване осадження, тим самим пом'якшуючи утворення дендритів та підвищуючи циклічну стабільність [34].

Іонна/електронна рухливість, а також структурна стабільність є ключовими факторами під час конструювання електродів. Серед інших аморфні матеріали останнім часом розглядаються завдяки їхній унікальній структурі.

В роботі [35] шляхом порівняння кристалічного та аморфного пероксиду літію Li_2O_2 та проведення відповідних розрахунків продемонстровано, що аморфні матеріали мають велику кількість дефектів і вакансій і можуть сприяти перенесенню іону Li+ в їхній об'ємній фазі. Експериментальна валідація досліджень додатково підтвердила, що аморфізація $Li_4Ti_5O_{12}$ сприяє дифузії Li+ та покращує іонну провід-

ність завдяки міграції іонів за допомогою дефектів [36]. Крім того, ненасичені активні центри можуть знижувати енергетичний бар'єр введення іонів Li в аморфний оксид рутенію - RuO_2, що призводить до зменшення поляризації та покращення робочої напруги [37].

Порівняно з традиційними кристалічними матеріалами, аморфні матеріали не містять меж зерен та дислокацій, які завжди служать областями концентрації напружень і мають тенденцію до руйнування. Таким чином, аморфні матеріали можуть ефективно послаблювати внутрішню напругу під час процесів введення/видалення іонів, що призводить до підвищеної структурної стабільності [34].

Описані ефекти особливо актуальні у водних Zn-іонних системах, де корозія та виділення водню зазвичай прискорюють деградацію продуктивності [38]. Автори [39] повідомляють, що аморфні сплавні покриття, такі як Ni–P, Co–P та Ni–B демонструють покращену кулонівську ефективність та довготривалу стабільність при багаторазових циклах використання.

Реакція виділення кисню (РВК) є невід'ємною частиною виробництва зеленого водню шляхом електролізу морської води. Однак вона стикається зі значними проблемами, включаючи недостатню каталітичну активність, виражену корозію, викликану іонами Cl−, та обмежений термін служби. В роботі [40] представлено гетероструктурований гібридний каталізатор, що складається з аморфного шаруватого подвійного гідроксиду NiFe (LDH) та кристалічного $NiMoO_4$. За рахунок синергетичної взаємодії, NiFe-LDH/$NiMoO_4$ продемонстровано високу ефективність РВК під час електролізу морської води.

За рахунок проведених експериментальних досліджень [40] показано, що побудована архітектура NiFe-LDH/$NiMoO_4$ значно покращує перенос електронів між Ni та феритами що призводить до утворення високовалентних частинок Ni, які є корисними для каталізу РВК. За цього інтеграція NiFe-LDH та $NiMoO_4$ зменшує корозію іонів Cl− та оптимізує адсорбцію життєво важливих кисневмісних проміжних продуктів, прискорюючи кінетику лужної морської води OER та покращуючи каталітичні характеристики під час процесу електролізу морської води.

На даний час виробництво високоефективних електрокаталізаторів для реакції виділення водню, які не містять благородних металів, є складним, але критично важливим завданням для галузі перетворення та виробництва зеленої енергії. Автори [41] повідомляють про створення нанопористого самопідтримуваного сайту CuTiMo, отриманого наноструктуруванням з металевого скла $Cu60Ti37Mo_3$, як високоефективного електрокаталізатор для вказаних цілей.

В даному випадку розроблено нанопористу структуру з металевого склоподібного сплаву, а не зі звичайного кристалічного сплаву, та окреслено комплексний робочий механізм розвитку нанопористої структури. Науковою новизною цього дослідження є наноструктурування металевого скла для формування подвійних кристалічних та аморфних центрів (сайтів). С творений двофазний нанопористий електрокаталізатор демонструє високу каталітичну активність, співмірну зі стандартним Pt-каталізатором, при вищих густинах струму (> 60 мА·см$^{-2}$). Електрокаталізатор стабільний навіть за високих густин струму (> 100 мА·см$^{-2}$) і потребує значно меншого значення перенапруги, ніж стандартний Pt/C каталізатор для реакції отримання водню за високих густин струму.

Деслегування бездефектного металевого скла призводить до утворення великої кількості каталітично активних центрів, а введення молібдену Mo в матрицю міднотитанового сплаву CuTi призводить до прискореної кінетики адсорбції/десорбції H_2. Виходячи з переваг розробки нанопористої структури з високометастабільного металевого скла, великої активної площі поверхні нанопористої структури на високопровідній підкладці, виняткової стабільності протягом тривалого часу та за високих густин струму, розроблений нанопористий металевий скляний композитний електрод має потенціал для різноманітних застосувань в процесі виробництва зеленої енергії.

Суперконденсатори, які також називають електрохімічними конденсаторами, привертають дедалі більшу увагу завдяки тривалому терміну служби, швидким циклам заряджання/розряджання (тривалістю від кількох секунд) та надзвичайно високій питомій потужності. [42]. Суперконденсатори доповнюють акумулятори, пропонуючи резервні джерела живлення у разі перебоїв з подачею електричного струму. Однак вони мають деякі недоліки, такі як низька щільність енергії та висока вартість виробництва, що значно обмежує їх практичне застосування. Для розв'язання цих проблем перспективним підходом є розробка нових матеріалів із нестандартною архітектурою. З огляду на унікальні характеристики, аморфні матеріали є потенційними кандидата-

ми для заміни кристалічних аналогів, оскільки вирізняються вищою міцністю, покращеною еластичністю, більшою площею поверхні, широкою варіативністю складу та високою хімічною стабільністю (стійкістю до корозії).

В роботі [43] представлено нову стратегію синтезу гнучкого нанопористого нікелевого (np-NiOxHy@Ni) електрода з покриттям з оксиду/гідроксиду нікелю, що містить проміжний шар з металевого скла шляхом одностадійного розплавлення стрічок Ni40Zr20Ti40. Завдяки пластичному проміжному шару металевого скла, сендвіч-подібний електрод демонструє чудову гнучкість, про яку не повідомлялося стосовно інших пористих стрічок з нелегованими сплавами.

Електрохімічні вимірювання показують, що електрод є, по суті, матеріалом батарейного типу, а також проявляє псевдоємнісну поведінку. Завдяки інтегрованій сендвіч-структурі та мережі np-NiOxHy@Ni, електрод демонструє підвищену ємність 778 Ф/см$^{-3}$ при густині струму 1 А/см$^{-3}$ у розчинах а також високу швидкодійність й виняткову циклічну стабільність [43].

Практичне використання аморфних металевих поверхонь відкриває унікальні можливості завдяки їхній високій міцності, корозійній стійкості та зносостійкості. Проте їхнє широке впровадження наразі стримується низкою деяких технологічних та економічних обмежень.

Створення аморфної структури вимагає екстремальних умов виробництва. Так для перетворення рідкого металу в аморфний стан потрібні швидкості охолодження 10^4…10^6 ^{0}С/сек. Цей процес потребує складного й дорогого обладнання, ефективного лише для виробів обмеженої форми та розміру, що суттєво обмежує можливості великомасштабного виробництва [44].

Технології лиття за моделями та методи швидкого затвердіння, вимагають точного контролю температури та швидкості охолодження для забезпечення утворення аморфних структур. Будь-яке навіть незначне відхилення цих параметрів може спричинити кристалізацію, що, у свою чергу, негативно вплине на експлуатаційні характеристики та надійність матеріалу [32].

Висока вартість аморфних сплавів зумовлена насамперед використанням дорогої високочистої сировини — такої як титан, цирконій та нікель, — а також складністю виробничого процесу. Сам процес виробництва, зокрема технології швидкого охолодження, потребує значних енерговитрат і використання високоточного обладнання, що додатково підвищує витрати. Крім того, суворі вимоги до точного контролю та специфічних умов середовища під час виготовлення можуть призводити до незначних відхилень, які, однак, суттєво збільшують частку браку, що, своєю чергою, підвищує загальні виробничі витрати [16].

Представлені результати досліджень ілюструють, як локальні структурні особливості аморфних матеріалів перетворюються на покращені функціональні характеристики на рівні пристрою. Забезпечуючи однорідне середовище реакції, підвищену механічну стійкість та стабільні інтерфейси, аморфні металеві поверхні забезпечують надійну платформу для енергетичних технологій. Разом з тим для їхнього ефективного впровадження потрібні подальші наукові дослідження.

Висновки

1. Проведений системний аналіз електохімічних систем накопичення енергії та підтверджено їхню роль у вирішенні проблем невідповідності між виробництвом та споживанням енергії. Показано, що одним з напрямків підвищення ефективності цих систем є використання аморфних матеріалів при їхньому конструюванні та виготовленні.

2. Встановлено, що висока продуктивність аморфних металевих матеріалів виникає завдяки взаємодії між структурним безладом, налаштованим хімічним середовищем та процесами, що домінують на інтерфейсі, які разом керують іонним транспортом, каталітичною активністю та механічною стабільністю.

3. Аморфні металеві матеріали є універсальною та об'єднуючою платформою для широкого спектру застосувань, пов'язаних з енергетикою, включаючи суперконденсатори, батареї, електрокаталітичні системи та пристрої сонячної енергії.

4. Майбутній прогрес досліджень та їхня практична реалізація буде залежати від інтеграції атомного дизайну, стабільності інтерфейсу, масштабованої обробки та композиційних інновацій.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Панчук А. М., Бойчук В. М., Присяжнюк П. М., Панчук М. В., Шекета В. І. Удосконалення методів дослідження елементного складу біопалив та сировини для їх виробництва. *Нафтогазова енергетика*. 2025. № 2 (44). С. 249–260. DOI: https://doi.org/10.31471/1993-9868-2025-2(44)-249-260

2. Панчук А., Панчук М., Дейнега Р. Перспективи впровадження технологій піролізу біомаси для збільшення виробництва біопалив. *Нафтогазова енергетика*. 2024. № 2 (42). С. 137–144. DOI: https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2(42)-137-145

3. Manufacturing techniques of elastomeric nanocellulose composites / M. Panchuk, M. Szkodo, M. Shlapak, V. Sheketa, P. Prysyazhnyk, A. Stanislawska. *Elastomeric Nanocellulose Composites*. 2024. P. 117–140. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18608-0.00024-3

4. Mahmoud M., Ramadan M., Olabi A. G., Pullen K., Naher S. A Review of Mechanical Energy Storage Systems Combined with Wind and Solar Applications. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 210. Art. 112670. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112670

5. Rekioua D. Energy storage systems for photovoltaic and wind systems: A review. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 9. Art. 3893. DOI: https://doi.org/10.3390/en16093893

6. Panchuk M., Panchuk A., Mandryk I. Problems of CO2 Emissions in Ukraine and Ways to Overcome Them. *Third International Sustainability and Resilience Conference: Climate Change* (Sakheer, Bahrain, 2021). P. 186–193. DOI: https://doi.org/10.1109/IEEECONF53624.2021.9668043

7. Applications of flywheel energy storage system on load frequency regulation combined with various power generations: A review / W. Ji et al. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 223. Art. 119975. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.119975

8. Integrating energy storage technologies with renewable energy sources: A pathway toward sustainable power grids / F. H. Malik et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 9. Art. 4097. DOI: https://doi.org/10.3390/su17094097

9. Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*. 2016. Vol. 179. P. 350–377. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097

10. Vasishtha A. Advanced Materials for Energy Conversion and Storage. *2025 7th International Conference on Inventive Material Science and Applications (ICIMA)* (Namakkal, India, 2025). P. 455–559. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIMA64861.2025.11074121

11. Treacy M. M. J., Borisenko K. B. The local structure of amorphous silicon. *Science*. 2012. Vol. 335, no. 6071. P. 950–953. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1214780

12. Amorphous alloys and differential scanning calorimetry (DSC) / D. Janovszky et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 7141–7157. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-021-11054-0

13. Mir R. A., Kirk D. W., Thorpe S. J. Recent progress and advances in nickel-based amorphous metal alloys towards alkaline water splitting: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 976. Art. 173211. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173211

14. Development of Amorphous Metallic Surfaces for Energy Storage Applications / O. Sotelo-Mazón et al. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, no. 8. Art. 4039. DOI: https://doi.org/10.3390/app160840399

15. Roadmap for next-generation electrochemical energy storage technologies: Secondary batteries and supercapacitors / Y. Yao et al. *ACS Nano*. 2025. Vol. 19. P. 30568–30687. DOI: https://doi.org/10.1021/acsnano.4c10091

16. Feng Z., Geng H., Zhuang Y., Li P. Progress, applications, and challenges of amorphous alloys: A critical review. *Inorganics*. 2024. Vol. 12, no. 9. Art. 232. DOI: https://doi.org/10.3390/inorganics12090232

17. High-entropy amorphous catalysts for water electrolysis: A new frontier / G. Wang et al. *Nano-Micro Letters*. 2026. Vol. 18. Art. 77. DOI: https://doi.org/10.1007/s40820-025-01936-5

18. Hwang S., Koh H., Yang J. C. Electron microscopy approaches to unraveling the structure of amorphous materials. *Small Methods*. 2026. Vol. 10. Art. e01852. DOI: https://doi.org/10.1002/smtd.202501852

19. Aldayyat A., Yam F. K. Recent development in metal phosphate-based electrode materials for supercapacitor application: A review. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2025. Vol. 29. P. 4249–4280. DOI: https://doi.org/10.1007/s10008-025-06280-7

20. Ning S. R., Gao J., Wang Y. G. Review on Applications of Low Loss Amorphous Metals in Motors. *Advanced Materials Research*. 2011. Vols. 129–131. P. 1366–1371. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.129-131.1366

21. Ma D., Stoica A., Wang X.-L. Power-law scaling and fractal nature of medium-range order in metallic glasses. *Nature Materials*. 2009. Vol. 8. P. 30–34. DOI: https://doi.org/10.1038/nmat2340

22. Structures and functional properties of amorphous alloys / H. Jiang et al. *Small Structures*. 2021. Vol. 2. Art. 2000057. DOI: https://doi.org/10.1002/sstr.202000057

23. Sheng H. W., Luo W. K., Alamgir F. M., Bai J. M., Ma E. Atomic packing and short-to-medium-range order in metallic glasses. *Nature*. 2006. Vol. 439. P. 419–425. DOI: https://doi.org/10.1038/nature04421

24. Three-dimensional atomic packing in amorphous solids with liquid-like structure / Y. Yuan et al. *Nature Materials*. 2022. Vol. 21. P. 95–102. DOI: https://doi.org/10.1038/s41563-021-01123-x

25. Spatial distribution and connectivity of medium-range order signatures in a metallic glass probed with simulated and experimental 4D-STEM / B. Riechers et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2026. Vol. 1058. Art. 186631. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186631

26. Atomic-scale strain fluctuations as an origin for elastic microstructures in metallic glasses / R. Rashidi et al. *Acta Materialia*. 2026. Vol. 308. Art. 121982. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2026.121982

27. Substantially enhanced plasticity of bulk metallic glasses by densifying local atomic packing / Y. Wu et al. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Art. 6582. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-021-26880-2

28. Enhancing mechanical properties and corrosion resistance of Zr-based bulk metallic glasses by Ta addition / H. Shi et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2025. Vol. 650. Art. 123370. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.123370

29. Research progress on the corrosion behavior of metallic glass and its composites / L. Li et al. *Metals*. 2025. Vol. 15. Art. 1345. DOI: https://doi.org/10.3390/met15121345

30. Electrochemical Characterization of Amorphous and Crystalline Ni62Nb38 and Ni59.24Nb37.76B3.00 Alloys / E. V. da Costa et al. *VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*. 2024. Vol. 34, no. 1. DOI: https://doi.org/10.14295/vetor.v34i1.17711

31. Yang S., Jiao F., Gong Y. Electrochemical Crystalline/Amorphous Ni(OH)S@CoFe-LDH/NF For Efficient Oxygen Evolution Reaction. *SSRN*. 2023. DOI: https://doi.org/10.2139/ssrn.4591388

32. Аморфні сплави як перспективний клас функціональних матеріалів. Ч. 1: Методи одержання, структура, фізико-механічні властивості / В. А. Дехтяренко та ін. *Успіхи фізики металів*. 2025. Т. 26, № 3. С. 598–625.

33. Prospects for magnesium ion batteries: A comprehensive materials review / A. Das et al. *Coordination Chemistry Reviews*. 2024. Vol. 502. Art. 215593. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215593

34. Guo T., Hu P., Li L., Wang Z., Guo L. Amorphous materials emerging as prospective electrodes for electrochemical energy storage and conversion. *Chem*. 2023. Vol. 9. P. 1080–1093. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chempr.2023.03.032

35. Tian F., Radin M. D., Siegel D. J. Enhanced charge transport in amorphous Li2O2. *Chemistry of Materials*. 2014. Vol. 26. P. 2952–2959. DOI: https://doi.org/10.1021/cm5007372

36. Li-ion battery material under high pressure: amorphization and enhanced conductivity of Li4Ti5O12 / Y. W. Huang et al. *National Science Review*. 2019. Vol. 6. P. 239–246. DOI: https://doi.org/10.1093/nsr/nwy122

37. Delmer O., Balaya P., Kienle L., Maier J. Enhanced potential of amorphous electrode materials: case study of RuO2. *Advanced Materials*. 2008. Vol. 20. P. 501–505. DOI: https://doi.org/10.1002/adma.200701349

38. Synergistic cooperation of Zn (002) texture and amorphous zinc phosphate for dendrite-free Zn anodes / X. Song et al. *ACS Nano*. 2023. Vol. 17. P. 15113–15124. DOI: https://doi.org/10.1021/acsnano.3c04343

39. Electroless deposition of Ni-Co-B-P coating as a durable electrode for hydrogen evolution reaction in alkaline media / T. Liu et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 102. P. 900–908. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.095

40. A corrosion-resistant amorphous/crystalline heterostructured catalyst for industrial-level seawater electrolysis in membrane electrode assembly electrolyzer / L. Wang et al. *Advanced Functional Materials*. 2025. Vol. 35. Art. 2417603. DOI: https://doi.org/10.1002/adfm.202417603

41. Aneeshkumar K. S., Tian J., Shen J. Dual-phase amorphous–nanocrystalline nanoporous sites activated in Mo inserted CuTi metallic glass as efficient electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 886. Art. 161270. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161270

42. Flexible integrated metallic glass-based sandwich electrodes for high-performance wearable all-solid-state supercapacitors / C. Qin et al. *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 19. Art. 100539. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100539

43. Robust nanoporous copper-nickel@copper-nickel oxides/metallic glass sandwiches enabling highly flexible supercapacitors / D. Zheng et al. *Applied Surface Science*. 2025. Vol. 696. Art. 162995. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.162995

44. A review of the preparation and prospects of amorphous alloys by mechanical alloying / X. J. Yuan et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 33. P. 3117–3143. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.026

References

1. Panchuk, A. M., Boichuk, V. M., Prysiatniuk, P. M., Panchuk, M. V., & Sheketa, V. I. (2025). Udoskonalennia metodiv doslidzhennia elementnoho skladu biopaliv ta syrovyny dlia yikh vyrobnytstva [Improvement of methods for studying the elemental composition of biofuels and raw materials for their production]. *Naftohazova Enerhetyka*, (2(44)), 249–260. https://doi.org/10.31471/1993-9868-2025-2(44)-249-260 (in Ukrainian)

2. Panchuk, A., Panchuk, M., & Deineha, R. (2024). Perspektyvy vprovadzhennia tekhnolohii pirolizu biomasy dlia zbilshennia vyrobnytstva biopaliv [Prospects for the implementation of biomass pyrolysis technologies to increase biofuel production]. *Naftohazova Enerhetyka*, (2(42)), 137–144. https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2(42)-137-145 (in Ukrainian)

3. Panchuk, M., Szkodo, M., Shlapak, M., Sheketa, V., Prysyazhnyk, P., & Stanislawska, A. (2024). Manufacturing techniques of elastomeric nanocellulose composites. In *Elastomeric Nanocellulose Composites* (pp. 117–140). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18608-0.00024-3

4. Mahmoud, M., Ramadan, M., Olabi, A. G., Pullen, K., & Naher, S. (2020). A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*, *210*, Article 112670. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112670

5. Rekioua, D. (2023). Energy storage systems for photovoltaic and wind systems: A review. *Energies*, *16*(9), Article 3893. https://doi.org/10.3390/en16093893

6. Panchuk, M., Panchuk, A., & Mandryk, I. (2021). *Problems of CO2 emissions in Ukraine and ways to overcome them*. Paper presented at the Third International Sustainability and Resilience Conference: Climate Change, Sakheer, Bahrain. https://doi.org/10.1109/IEEECONF53624.2021.9668043

7. Ji, W., Hong, F., Zhao, Y., Liang, L., Du, H., Hao, J., Fang, F., & Liu, J. (2024). Applications of flywheel energy storage system on load frequency regulation combined with various power generations: A review. *Renewable Energy*, *223*, Article 119975. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.119975

8. Malik, F. H., Hussain, G. A., Alsmadi, Y. M., Haider, Z. M., Mansoor, W., & Lehtonen, M. (2025). Integrating energy storage technologies with renewable energy sources: A pathway toward sustainable power grids. *Sustainability*, *17*(9), Article 4097. https://doi.org/10.3390/su17094097

9. Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, *179*, 350–377. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097

10. Vasishtha, A. (2025). *Advanced materials for energy conversion and storage*. Paper presented at the 7th International Conference on Inventive Material Science and Applications (ICIMA), Namakkal, India. https://doi.org/10.1109/ICIMA64861.2025.11074121

11. Treacy, M. M. J., & Borisenko, K. B. (2012). The local structure of amorphous silicon. *Science*, *335*(6071), 950–953. https://doi.org/10.1126/science.1214780

12. Janovszky, D., Sveda, M., Sycheva, A., Kristaly, F., Zámborszky, F., Koziel, T., Bala, P., Czel, G., & Kaptay, G. (2022). Amorphous alloys and differential scanning calorimetry (DSC). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *147*, 7141–7157. https://doi.org/10.1007/s10973-021-11054-0

13. Mir, R. A., Kirk, D. W., & Thorpe, S. J. (2024). Recent progress and advances in nickel-based amorphous metal alloys towards alkaline water splitting: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, *976*, Article 173211. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173211

14. Sotelo-Mazón, O., Henao, J., Zezatti, V., Rojas, H., Espinosa-Arbeláez, D., Mondragón-Rodríguez, G. C., & Poblano-Salas, C. A. (2026). Development of amorphous metallic surfaces for energy storage applications. *Applied Sciences*, *16*(8), Article 4039. https://doi.org/10.3390/app16084039

15. Yao, Y., Rui, X., Bai, R., Ouyang, Y., Li, G., Zhao, Y., Zhu, Y., Zhao, M., Li, B. Q., Zhang, X., & et al. (2025). Roadmap for next-generation electrochemical energy storage technologies: Secondary batteries and supercapacitors. *ACS Nano*, *19*, 30568–30687. https://doi.org/10.1021/acsnano.4c10091

16. Feng, Z., Geng, H., Zhuang, Y., & Li, P. (2024). Progress, applications, and challenges of amorphous alloys: A critical review. *Inorganics*, *12*(9), Article 232. https://doi.org/10.3390/inorganics12090232

17. Wang, G., Chen, Z., Zhu, J., Xie, J., Wei, W., Yan, Y. M., & Ni, B. J. (2026). High-entropy amorphous catalysts for water electrolysis: A new frontier. *Nano-Micro Letters*, *18*, Article 77. https://doi.org/10.1007/s40820-025-01936-5

18. Hwang, S., Koh, H., & Yang, J. C. (2026). Electron microscopy approaches to unraveling the structure of amorphous materials. *Small Methods*, *10*, Article e01852. https://doi.org/10.1002/smtd.202501852

19. Aldayyat, A., & Yam, F. K. (2025). Recent development in metal phosphate-based electrode materials for supercapacitor application: A review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, *29*, 4249–4280. https://doi.org/10.1007/s10008-025-06280-7

20. Ning, S. R., Gao, J., & Wang, Y. G. (2011). Review on applications of low loss amorphous metals in motors. *Advanced Materials Research*, *129–131*, 1366–1371. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.129-131.1366

21. Ma, D., Stoica, A., & Wang, X.-L. (2009). Power-law scaling and fractal nature of medium-range order in metallic glasses. *Nature Materials*, *8*, 30–34. https://doi.org/10.1038/nmat2340

22. Jiang, H., Shang, T., Xian, H., Sun, B., Zhang, Q., Yu, Q., Bai, H., Gu, L., & Wang, W. (2021). Structures and functional properties of amorphous alloys. *Small Structures*, *2*, Article 2000057. https://doi.org/10.1002/sstr.202000057

23. Sheng, H. W., Luo, W. K., Alamgir, F. M., Bai, J. M., & Ma, E. (2006). Atomic packing and short-to-medium-range order in metallic glasses. *Nature*, *439*, 419–425. https://doi.org/10.1038/nature04421

24. Yuan, Y., Kim, D. S., Zhou, J., Chang, D. J., Zhu, F., Nagaoka, Y., Yang, Y., Pham, M., Osher, S., Chen, O., & et al. (2022). Three-dimensional atomic packing in amorphous solids with liquid-like structure. *Nature Materials*, *21*, 95–102. https://doi.org/10.1038/s41563-021-01123-x

25. Riechers, B., Pekin, T. C., Luo, X. Y., Sun, Y., Koch, C. T., Derlet, P. M., & Maaß, R. (2026). Spatial distribution and connectivity of medium-range order signatures in a metallic glass probed with simulated and experimental 4D-STEM. *Journal of Alloys and Compounds*, *1058*, Article 186631. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186631

26. Rashidi, R., Vaerst, Ø., Riechers, B., Rösner, H., Wilde, G., & Maaß, R. (2026). Atomic-scale strain fluctuations as an origin for elastic microstructures in metallic glasses. *Acta Materialia*, *308*, Article 121982. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2026.121982

27. Wu, Y., Cao, D., Yao, Y., Zhang, G., Wang, J., Liu, L., Li, F., Fan, H., Liu, X., Wang, H., & et al. (2021). Substantially enhanced plasticity of bulk metallic glasses by densifying local atomic packing. *Nature Communications*, *12*, Article 6582. https://doi.org/10.1038/s41467-021-26880-2

28. Shi, H., Xu, Y., Liang, G., Zhan, J., Chen, J., & Guo, X. (2025). Enhancing mechanical properties and corrosion resistance of Zr-based bulk metallic glasses by Ta addition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *650*, Article 123370. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.123370

29. Li, L., Qian, Y., Wang, Z., Tong, Q., Wang, M., Pan, Q., & Yu, Y. (2025). Research progress on the corrosion behavior of metallic glass and its composites. *Metals*, *15*(12), Article 1345. https://doi.org/10.3390/met15121345

30. da Costa, E. V., da Silva, M. L., de Carvalho, M. P., da Cruz, D. M., Aliaga, L. C., & Bastos, I. N. (2024). Electrochemical characterization of amorphous and crystalline Ni62Nb38 and Ni59.24Nb37.76B3.00 alloys. *VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, *34*(1). https://doi.org/10.14295/vetor.v34i1.17711

31. Yang, S., Jiao, F., & Gong, Y. (2023). *Electrochemical crystalline/amorphous Ni(OH)S@CoFe-LDH/NF for efficient oxygen evolution reaction*. SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.4591388

32. Dekhtyarenko, V. A., Nosenko, V. K., Kyrylchuk, V. V., Nosenko, A. V., Semyrga, O. M., Yevlash, I. K., & Bondarchuk, V. I. (2025). Amorphous alloys as a promising class of functional materials. Pt. 1: Manufacturing methods, structure, physical and mechanical properties. *Progress in Physics of Metals*, *26*(3), 598–625. (in Ukrainian)

33. Das, A., Balakrishnan, N. T., Sreeram, P., Fatima, M. J., Joyner, J. D., Thakur, V. K., Pullanchiyodan, A., Ahh, J. H., & Raghavan, P. (2024). Prospects for magnesium ion batteries: A comprehensive materials review. *Coordination Chemistry Reviews*, *502*, Article 215593. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215593

34. Guo, T., Hu, P., Li, L., Wang, Z., & Guo, L. (2023). Amorphous materials emerging as prospective electrodes for electrochemical energy storage and conversion. *Chem*, *9*(5), 1080–1093. https://doi.org/10.1016/j.chempr.2023.03.032

35. Tian, F., Radin, M. D., & Siegel, D. J. (2014). Enhanced charge transport in amorphous Li2O2. *Chemistry of Materials*, *26*(9), 2952–2959. https://doi.org/10.1021/cm5007372

36. Huang, Y. W., He, Y., Sheng, H., Lu, X., Dong, H. N., Samanta, S., Dong, H. L., Li, X. F., Kim, D. Y., Mao, H. K., & et al. (2019). Li-ion battery material under high pressure: Amorphization and enhanced conductivity of Li4Ti5O12. *National Science Review*, *6*(2), 239–246. https://doi.org/10.1093/nsr/nwy122

37. Delmer, O., Balaya, P., Kienle, L., & Maier, J. (2008). Enhanced potential of amorphous electrode materials: Case study of RuO2. *Advanced Materials*, *20*(3), 501–505. https://doi.org/10.1002/adma.200701349

38. Song, X., Bai, L., Wang, C., Wang, D., Xu, K., Dong, J., & Yang, J. (2023). Synergistic cooperation of Zn (002) texture and amorphous zinc phosphate for dendrite-free Zn anodes. *ACS Nano*, *17*(15), 15113–15124. https://doi.org/10.1021/acsnano.3c04343

39. Liu, T., Li, N., Wu, B., Han, X., Ding, Q., Zhao, Q., Cheng, Q., Wang, R., & Li, D. (2025). Electroless deposition of Ni-Co-B-P coating as a durable electrode for hydrogen evolution reaction in alkaline media. *International Journal of Hydrogen Energy*, *102*, 900–908. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.095

40. Wang, L., Huang, K., Zheng, X., Liu, Y., Wu, J., Dai, Q., & Hou, Y. (2025). A corrosion-resistant amorphous/crystalline heterostructured catalyst for industrial-level seawater electrolysis in membrane electrode assembly electrolyzer. *Advanced Functional Materials*, *35*, Article 2417603. https://doi.org/10.1002/adfm.202417603

41. Aneeshkumar, K. S., Tian, J., & Shen, J. (2021). Dual-phase amorphous–nanocrystalline nanoporous sites activated in Mo inserted CuTi metallic glass as efficient electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds*, *886*, Article 161270. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161270

42. Qin, C., Zheng, D., Hu, Q., Zhang, X., Wang, Z., Li, Y., Zhu, J., Ou, J. Z., Yang, C., & Wang, Y. (2020). Flexible integrated metallic glass-based sandwich electrodes for high-performance wearable all-solid-state supercapacitors. *Applied Materials Today*, *19*, Article 100539. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100539

43. Zheng, D., Lai, Y., Wang, M., Gong, C., Li, Q., Xie, H., Bai, Q., & Zhang, C. (2025). Robust nanoporous copper-nickel@copper-nickel oxides/metallic glass sandwiches enabling highly flexible supercapacitors. *Applied Surface Science*, *696*, Article 162995. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.162995

44. Yuan, X. J., Zhang, Y. R., Qu, X. H., Yin, H. Q., Li, S., Yan, Z. W., Tan, Z. J., Hu, S. M., Gao, Y. G., & Guo, P. Y. (2024). A review of the preparation and prospects of amorphous alloys by mechanical alloying. *Journal of Materials Research and Technology*, *33*, 3117–3143. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.026

DEVELOPMENT OF AMORPHOUS METALLIC SURFACES FOR APPLICATION IN ENERGY STORAGE SYSTEMS

Panchuk M. V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4898-2707
e-mail: ztk@nung.edu.ua

Kryshtopa L. I.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-5274-0217
e-mail: liudmyla.kryshtopa@nung.edu.ua

Deineha R. O.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1141-7672
e-mail: ruslan.deineha@nung.edu.ua

Nykolyn U. M.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9111-1280
e-mail: uliana.nykolyn@nung.edu.ua

Panchuk T. M.
Lecturer
King Danylo University
35 Yevhena Konovaltsia Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-6118-1568
e-mail: panchuk773@gmail.com

Abstract. Electrochemical energy storage systems, including batteries, fuel cells and supercapacitors, are crucial in addressing the imbalance between energy production and consumption. However, these systems also have several drawbacks, including high cost, limited lifespan, capacity loss, environmental risks and low energy density. A key challenge in improving energy storage systems is to investigate how advanced materials could overcome the limitations and shortcomings of modern energy systems. Amorphous metals, with their disordered atomic structure and unique interfacial properties, have emerged as a promising class of functional materials for energy storage and conversion. This study examines the impact of structural disorder — the ratio of short-range to medium-range order — on key properties such as electronic structure, ion transport, catalytic activity and mechanical ductility. It was found that adjusting the distribution of densely packed regions in amorphous materials increases plastic deformation by 2–8%, promoting a more uniform distribution of shear stress. The scientific novelty of the results lies in the comparative analysis of the functional characteristics of different material classes, which revealed that amorphous structures exhibit higher electrochemical activity, stability and energy storage efficiency than their crystalline counterparts. Additionally, the advantages of the material's local architecture in energy applications have been substantiated, with evidence showing that atomic-scale heterogeneity directly governs diffusion processes and reaction kinetics. Examples from the energy sector show that the functional performance of amorphous metals depends not only on their composition, but also on the distribution, connectivity and evolution of local atomic structures. The unique performance of amorphous metallic materials arises from the interaction between structural disorder, a tailored chemical environment, and interface-dominated processes, which together govern ion transport, catalytic activity, and mechanical stability. Thus, it can be argued that amorphous metal surfaces have become a universal platform for enhancing performance across a wide range of energy conversion and storage technologies.

Keywords: amorphous metals, short-range order, medium-range order, metallic glasses, ion transport, electrochemical surfaces.