

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-33>

УДК 621.317

МИГАЛЬ Михайло

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0000-4166-9470>

e-mail: [mykhailo.m.myhal@lpnu.ua](mailto:mykhailo.m.myhal@lpnu.ua)

ГАМУЛА Павло

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-6739-5498>

[pavlo.r.hamula@lpnu.ua](mailto:pavlo.r.hamula@lpnu.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ, ЯК ПЕРСПЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СЕНСОРІВ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

У дослідженні проводиться аналіз потенціалу високоентропійних сплавів для застосувань в якості елементу у сенсорних системах, зосереджуючись на їх стабільності, магнітних властивостях і електрохімічних характеристиках. Високоентропійні сплави є перспективними матеріалами для різних сенсорних систем, включаючи термопари та хімічні сенсори, завдяки їх високотемпературній стабільності, механічній міцності та чутливості для виявлення речовин, таких як глюкоза та оксид азоту. Сполучення декількох металів у сплавах створює синергетичний ефект, який змінює їхні електрокаталітичні властивості, роблячи ці сплави привабливими для технологічних інновацій.

Ключові слова: високоентропійні сплави, сенсори, термопари, каталітичні властивості, електричні властивості, магнітні властивості, електрохімічна реакція, виявлення глюкози, медичні сенсори, газові детектори.

MYHAL Mykhaylo, GAMULA Pawlo

Lviv Polytechnic National University

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY ALLOYS AS PROMISING MATERIALS FOR PHYSICAL QUANTITY SENSORS

In recent years, high-entropy alloys (HEAs) have attracted considerable attention in the field of materials science due to their characteristic properties and potential applications. Unlike traditional alloys, which typically consist of one or two major elements, these are composed of five or more major elements in nearly equiatomic proportions. This unconventional composition results in high configurational entropy, which gives them good mechanical, thermal, and electrical properties.

Characteristics such as high strength, high wear resistance, thermal stability, and corrosion resistance make HEAs suitable candidates for a variety of advanced applications. Among these applications, their use in the development of sensors for measuring physical quantities is particularly promising. Sensors are critical components of many technological systems, ranging from industrial automation and environmental monitoring to healthcare and aerospace. The performance and reliability of these sensors largely depend on the materials from which they are made. The current research is aimed at analyzing the properties of HEAs in order to evaluate their potential as materials for sensors of physical quantities. By understanding the fundamental structural, mechanical, and electrical properties of alloys, it becomes possible to assess their suitability for sensor applications.

In this study, we analyse the potential of high-entropy alloys for applications as an element in sensor systems, focusing on their stability, magnetic properties and electrochemical characteristics. High-entropy alloys are promising materials for various sensor systems, including thermocouples and chemical sensors, due to their high-temperature stability, mechanical strength, and sensitivity for detecting substances such as glucose and nitric oxide. The combination of several metals in alloys creates a synergistic effect that enhances their electrocatalytic properties, making these alloys attractive for technological innovations.

Keywords: high-entropy alloys, sensors, thermocouples, catalytic properties, electrical properties, magnetic properties, electrochemical reaction, glucose detection, medical sensors, gas detectors.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

В останні роки високоентропійні сплави (ВЕС) привертають значну увагу в галузі матеріалознавства завдяки своїм характерним властивостям і потенційним застосуванням. На відміну від традиційних сплавів, які зазвичай складаються з одного або двох основних елементів, вони складаються з п'яти або більше основних елементів у майже еквіатомних пропорціях. Цей нетрадиційний склад призводить до високої конфігураційної ентропії, яка надає їм хороші механічні, термічні та електричні властивості.

Такі характеристики, як висока міцність, велика зносостійкість, термічна стабільність і стійкість до корозії, роблять ВЕС придатними кандидатами для різноманітних передових застосувань. Серед цих застосувань особливо перспективним є використання їх у розробці сенсорів для вимірювання фізичних величин. Сенсори є критично важливими компонентами багатьох технологічних систем, починаючи від промислової автоматизації та моніторингу навколишнього середовища до охорони здоров'я та аерокосмічної галузі. Продуктивність і надійність цих перетворювачів значною мірою залежать від матеріалів, з яких вони виготовлені.

Поточне дослідження спрямоване на аналіз властивостей ВЕС, щоб оцінити їхній потенціал як матеріалів для сенсорів фізичних величин. При розумінні фундаментальних структурних, механічних та електричних властивостей сплавів, з'являється можливість оцінювання їхньої придатності для сенсорних застосувань.

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою даної статті є оцінка потенціалу високоентропійних сплавів як матеріалів для сенсорів фізичних величин, аналіз їх основних властивостей, визначення областей застосування та розробка рекомендацій для подальших досліджень, щоб подолати існуючі обмеження.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

ВЕС визначаються як сплави, які складаються з 5 або більше основних легуючих елементів, де атомний відсоток кожного компонента зазвичай є однаковим або подібним. Ці композиції часто призводять до унікальних властивостей, яких неможливо досягти за допомогою звичайних підходів до легування, які базуються лише на одному основному легуючому елементі [1].

Зазвичай, високоентропійні сплави можуть бути імплементованими у структуру сенсорних систем різних типів, кожен з яких має власне призначення та механізм роботи. Потенціальні можливості щодо застосування сенсорних систем фізичних величин з використанням ВЕСів включають: вимірювання температури (термопари, резистивні температурні детектори, термістори, інфрачервоні сенсори), тиску (п'єзоелектричні, емнісні та тензометричні датчики), швидкості потоку рідин (турбінні, ультразвукові витратоміри та теплові масові витратоміри), концентрації газоподібних (електрохімічні, напівпровідникові газові сенсори), детектори магнітного поля [2].

Задля розуміння того, яким чином ВЕС мають потенціал до покращення функціональних здібностей сенсорних приладів, які визначають фізичні величини, необхідно більш точно проаналізувати властивості даних матеріалів. До основних з них відносяться:

– висока конфігураційна ентропія – згідно з правилом фаз Гіббса, кількість присутніх фаз ( $P$ ) при постійному тиску та рівноважних умовах дорівнює  $P = C + 1 - F$ , де  $C$  являє собою кількість компонентів, а  $F$  – кількість ступенів свободи. Наприклад, у випадку 5-компонентною системою в незмінній точці ( $F=0$ ) при заданому тиску, та при максимум 6 рівноважних фазах, однофазні змішані кристали зазвичай утворюються в окремих сплавах з високою ентропією. Ці фази мають високу конфігураційну ентропію і тому стабілізовані порівняно, наприклад, з інтерметалічними фазами, які дуже часто є впорядкованими і тому мають низьку конфігураційну ентропію. Висока конфігураційна ентропія є результатом припущення, що ймовірність зайнятості для всіх основних елементів сплаву в місці кристалічної ґратки є однаковою. З екіатомним складом конфігураційна ентропія  $\Delta S_k$  дорівнюватиме:  $\Delta S_k = R * \ln(N)$ ,  $N$  – кількість компонентів сплаву, а  $R$  – газова стала;

– сильне викривлення ґратки – спричинене тим фактом, що розміри окремих атомів, які можуть займати вузол ґратки, можуть сильно відрізнятися у ВЕС. Ця характерна властивість використовується як причина високої міцності об'ємноцентрованих кубічних високоентропійних сплавів;

– ефект «м'явої дифузії», який полягає у тому, що дифузія атомів у ВЕС є особливо повільним процесом порівняно зі звичайними сплавами. На це вказує утворення нанокристалів під час охолодження. Така поведінка свідчить про мікроструктурну стабільність і підтверджується труднощами з дифузією заміщення в НЕА. Це пов'язано з високими енергіями активації, які зумовлені статистичним розподілом елементів у кристалічній ґратці, різними партнерами зв'язування та їх енергією;

– ефект коктейлю який, означає, що при змішуванні різних елементів, можуть з'явитися нові властивості, які не притаманні окремим елементам, якщо розглядати їх окремо.

Одним з найпоширеніших процесів виробництва ВЕС на сьогоднішній день полягає в багаторазовому плавленні чистих елементів за допомогою вакуумно-дугової печі, або альтернативно, в індукційній печі. Щоб забезпечити відповідну гомогенізацію після плавлення, зазвичай потрібен подальший відпал в інертній атмосфері при температурах між 1200-1800 °C - залежно від хімічного складу ВЕС. Для спеціального регулювання розмірів зерен і зменшення мікросегрегації можлива рекристалізація сплаву шляхом холодного формування з подальшим відпалом, за умови, що сплави мають достатню пластичність. Інший варіант, який особливо підходить для деталей зі складнішою геометрією являє собою виробництво з використанням порошкової металургії, під час якої чисті елементи або попередньо сплавлені системи змішуються разом у вигляді порошку та/або механічно подрібнюються за допомогою кульових млинів, а потім спікаються [3, 4]. Однак у цих процесах, особливо у сплавах, які часто містять реакційноздатні елементи, такі як Zr і Ti, ризик забруднення O або N виявляється особливо високим через дуже велику площу поверхні металевого порошку.

У випадку ентропії змішування, згідно з класичною термодинамічною теорією змішування, припускається, що атоми, присутні у розчині, мають однаковий розмір. Однак насправді - це не так, особливо при еквімолярних концентраціях відмінності між атомними розмірами основних елементів призводять до надлишкових умов ентропії змішування, які, як правило, невідомі для ВЕСів і можуть спричинити асиметричні функції ентропії. Термодинамічні дані для ВЕС також зазвичай надходять із простих подвійних і потрійних систем сплавів, де легуючі елементи сплавлені в низьких концентраціях і такі надлишкові ентропійні умови є незначними. З інколи великою різницею в розмірах атомів координаційні числа в сильно напружених ґратках також можуть відрізнятися, що також впливає на ентальпію змішування, яка залежить від кількості сусідніх зв'язуючих партнерів [5].

Імплементація ВЕС у елементи сенсорів може бути реалізована у різних формах, наприклад шляхом інтеграції наночастинок цих сплавів, або безпосереднього виготовлення певного елемента з такого сплаву.

Перспективним методом виробництва наночастинок ВЕС з метою їх подальшої інтеграції у структуру сенсорів є імпульсна лазерна абляція. Для цього лазер скеровується на поверхню металу з певною кількістю енергії, збиваючи з неї атоми. Поверхня металу знаходиться в рідині, що означає, що розбиті атоми відносяться від поверхні та не можуть рекомбінуватися з нею. Деякі з цих атомів знову агломеруються, утворюючи наночастинки. Схема деградації ВЕС на наночастинки за допомогою імпульсної лазерної абляції представлено на рисунку 1.

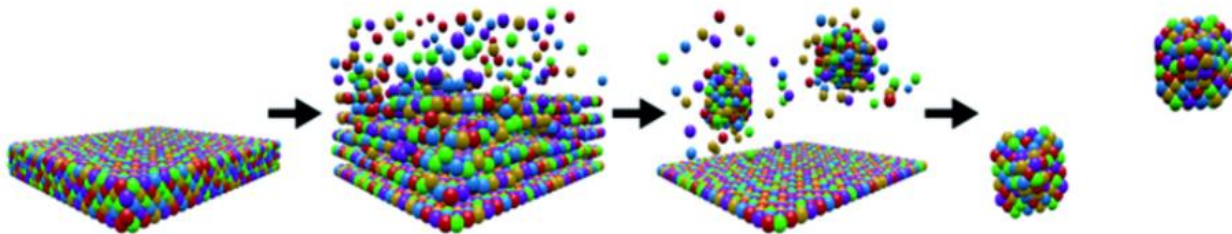


Рис. 1. Деградація високоентропійного сплаву на наночастинки за допомогою імпульсної лазерної абляції

Структура наночастинок також є причиною покращеного каталітичного ефекту. Поверхневий натяг наночастинок є важливим фактором їх каталітичної дії, оскільки викривлення атомної ґратки сприяє адсорбції та десорбції. Інша причина полягає у тому, що через різні розміри атомів, які все ще утворюють ґратку, сплави зазвичай не мають постійного поверхневого натягу, що залежить від того, які з компонентів були використані у виробленні сплаву. Це означає, що ці структури можуть мати як переваги низького поверхневого натягу, так і переваги поверхневого натягу, що перевищує ідеальний.

У ході дослідження [6] було визначено високочутливе визначення триетиламіну за допомогою  $\text{TiZrCrVNi}$  (NP-сплав) індукованого наночастинками контролю енергії Фермі  $\text{MoS}_2$ . Нанопласти  $\text{MoS}_2$  збільшилися приблизно в 100 разів, сприйнявши реакцію на триетиламін. Вакуумно-дугова плавка в інертній атмосфері була використана для створення еквіатомного  $\text{TiZrVCrNi}$  сплаву. Для приготування гомогенізований сплав було подрібнено на шматочки та кріомельвано. Згідно з рентгенівською фотоелектронною спектроскопією, включення зазначеного сплаву фази Лавеса зменшує крайове окислення  $\text{MoS}_2$ . Крім того, це зменшення крайового стану призводить до значного закріплення рівня Фермі. Завдяки високотакатлітично активним металевим наночастинкам це призводить до реакції типу носія, специфічної для цільового газу, і селективного окислення парів триетиламіну. Отриманий композит ( $\text{MoS}_2 + \text{NP}$ ) має сильний відгук близько 380% для 2000 ppm TEA, а також селективність третиламіну при 50 °C. Зазначені результати свідчать про потенційний успіх використання наночастинок ВЕСів у сенсорних системах газоподібних речовин.

З цією метою можуть застосовуватися квазікристалічні нанопласти у поєднанні з ВЕС, які являють собою тонкі двовимірні структури та які зазвичай синтезуються за допомогою таких методів, як фізичне осадження з парової фази. Двовимірні квазікристалічні структури мають велику площу поверхні, що полегшує прилипання газів і швидке протікання реакцій. Теорія функції густини передбачає, що квазікристалічні нанопласти містять велику кількість активних центрів для адсорбції молекул такого газу, як  $\text{NO}_2$  [7].

ВЕСи, розроблені для застосування при високих температурах, можна розділити на два основні класи:

- матеріали, які містять переважно недорогі метали з 3d перехідної групи періодичної таблиці;
- системи сплавів з переважною часткою тугоплавких металів.

Хоча суперсплави на основі нікелю мають унікальне поєднання механічних і корозійних властивостей, їх подальший розвиток є обмеженим, особливо в області високотемпературної техніки, відносно низькою температурою плавлення основного металу Ni ( $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Такий тип ВЕСів, як рефрактерні, до яких відносяться MoNbTaVW і MoNbTaW, демонструють властивості, які полягають у однофазній об'ємноцентровано-кубічній (body-centered cubic – BCC) мікроструктурі та високій границі текучості до температур  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , які вже значно вищі, ніж температури суперсплавів на основі нікелю при температурах  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Продуктивність рефрактерних ВЕСів, з одного боку, зумовлена дуже високою температурою плавлення деяких тугоплавких металів, таких як W ( $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) або Ta ( $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) порівняно з дуже легкоплавкими металами, такими як Al. Через сублимацію більш летючих неблагородних металів можуть виникати помітні відмінності в хімічному складі, що ускладнює відтворюване виробництво. Через дуже різні коефіцієнти дифузії в рефрактерних високоентропійних матеріалах часто можна спостерігати внутрішні напруги та сегрегації у формі дендритів і пор. З іншого боку, через високу стабільність оксидів тугоплавких металів під час плавлення необхідний дуже низький парціальний тиск кисню [8].

Причиною наявності однофазної об'ємноцентровано-кубічної структури є хімічний склад більшості сплавів, які складаються переважно з елементів гратчастої структури основних груп IV-VI. Менша частка однофазних об'ємноцентровано-кубічних рефрактерних ВЕСів також містить Al. Системи сплавів TaTiHfZr і MoNbTaTiZr мають двофазну матрицю, що складається з об'ємноцентрованої-кубічної та гексагональної щільноупакованої (hexagonal close-packed – hcp) фаз.

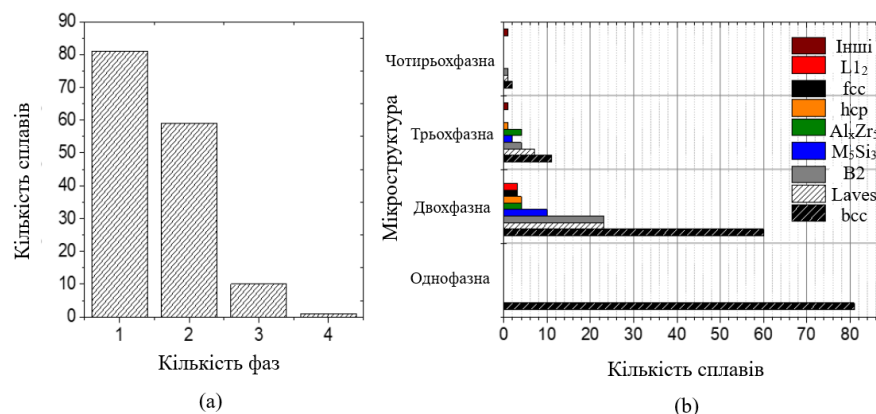


Рис. 2. Дослідження частоти одно- та багатофазних РЕВЕСів (а), відповідний кількісний розподіл фаз у відповідних системах сплавів (б)

Загалом, високотемпературна та механічна стабільність рефрактерних ВЕСів дозволяє їм бути потенціально правильним рішенням щодо імплементації у структуру термосенсорних систем у якості дротів, або інших[ елементів термопари, оскільки вони можуть витримувати механічні та теплові навантаження, які виникають у промислових умовах.

Високоентропійні сплави здатні вирішити проблему магнетизму традиційних м'яких магнітних матеріалів, яка полягала у наявності або сильного магнетизму матеріалу, або тому, що сам матеріал є доволі твердим. Однак деякі ВЕС на основі FeCoNi мають кращі м'які магнітні характеристики разом із чудовими механічними властивостями. Потрійний еквіатомний сплав FeCoNi, що має однофазову fcc структуру, демонструє вищу намагніченість насичення ( $M_s=151\text{ ему/г}$ ) з низькою коерцитивністю ( $H_c=1,52\text{ Ое}$ ). Будь-яке додавання інших парамагнітних або діамагнітних елементів впливатиме на його кінцеві магнітні характеристики, оскільки магнітні характеристики сплавів дуже чутливі до складу, легуючих елементів і результуючої фазової структури. Наприклад, додавання Cr до основного сплаву FeCoNi змінює його магнітну природу з феромагнітної на парамагнітну. Однак при подальшому додаванні Al або Pd в сплав CoCrFeNi парамагнітна природа основного сплаву змінилася на феромагнітну. Підвищення температури Кюрі за допомогою додавання Pd робить цей сплав корисним для магнітного охолодження при температурах, близьких до кімнатної.

Інше не менш важливе застосування полягає у їх інтеграції у структуру приладів, задачею яких є виявлення концентрації інших речовин, що має доволі велике значення у медичній сфері, так як пропонує додаткове рішення щодо лабораторних методів діагностики певних захворювань. Потенціал до такого електрохімічного застосування простежується у випадку сплаву Tr-PtPdNiFeC, який показав здатність виявляти концентрацію глюкози у даному середовищі завдяки своїм каталітичним властивостям. Даний сплав також було інтегровано в структуру хімічного сенсора шляхом подрібнення його до розміри наночастинок. Велика площа поверхні, особливо з невеликим розміром частинок (переважно зосередженими

в діапазоні 7-8 нм), забезпечують велику площу поверхні з великою кількістю відкритих електрохімічних активних центрів. Ця висока площа поверхні має вирішальне значення для ефективного окислення глюкози, оскільки вона посилює взаємодію між молекулами глюкози та поверхнею електрода. Рівномірний розподіл таких елементів, як Pt, Pd, Ni, Fe та Cu, усередині наночастинок забезпечує стабільну електрокаталітичну активність по всій поверхні електрода. Ця однорідність сприяє стабільності та відтворюваності процесу виявлення глюкози. Синергічний ефект: поєднання кількох металів у ВЕСах створює синергічний ефект, який покращує загальну електрокаталітичну дію. Цей ефект є результатом унікальних електронних і каталітичних властивостей сплаву, які перевершують властивості окремих металевих компонентів. Крім того, гранецентрована кубічна структура є сприятливою для каталітичних застосувань завдяки високій щільності активних центрів і сприятливим електронним властивостям. ГЦК структура також сприяє стабільності наночастинок під час електрохімічних реакцій. Електрохімічні властивості: HEA-NP демонструють високу чутливість і широкий діапазон виявлення глюкози з лінійною реакцією на концентрації глюкози в діапазоні від 0 до 10 мМ. Висока чутливість (1264 мкМ<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup>) і низька межа виявлення (4503 мкМ) вказують на те, що наночастинок сплаву можуть чітко виявляти навіть малі частинки глюкози.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Підсумовуючи, високоентропійні сплави пропонують перспективні властивості для різних застосувань, включаючи їх інтеграцію в сенсорні системи для вимірювання фізичних величин. Їхня високотемпературна та механічна стабільність робить їх придатними для використання в термосенсорних структурах, в якості таких застосувань як дроти або інші елементи термопар.

ВЕСи також вирішують проблеми, пов'язані з магнетизмом традиційних м'яких магнітних матеріалів, демонструючи покращені м'які магнітні характеристики разом із чудовими механічними властивостями. Потрійні екіатомні сплави, такі як FeCoNi, демонструють чудове магнітне насичення та низьку коерцитивну силу, що робить їх придатними для різноманітних магнітних сенсорних систем. Однак їх магнітні властивості чутливі до змін складу, додавання різних елементів впливає на їх магнітну природу.

Інше важливе застосування наших матеріалів полягає в їх інтеграції у пристрої, призначені для визначення концентрації різних речовин, по-перше газоподібних, що може підвищити безпеку замкнених приміщень, а також хімічних маркерів, що є особливо актуальним в галузі медицини для надання додаткових діагностичних рішень, окрім традиційних лабораторних методів. Наприклад, ВЕСи, такі як Tr-PtPdNiFeC, були успішно інтегровані в хімічні сенсори, демонструючи їх здатність виявляти концентрацію глюкози завдяки своїм каталітичним властивостям. Наночастинок даного демонструють високу чутливість і широкий діапазон виявлення глюкози, що вказує на їхній потенціал для застосування в електрохімічному зондуванні. Синергія, що виникає в результаті поєднання кількох металів посилює їх загальну електрокаталітичну дію. Крім того, гранецентрована кубічна (FCC) структура є сприятливою для каталітичних застосувань через високу щільність активних центрів і сприятливі електронні властивості.

Інтеграція нанопластівців MoS<sub>2</sub> і квазікристалічних нанолістів високоентропійного сплаву у нанокмпозити є перспективним шляхом для покращення продуктивності газових детекторів, зокрема для виявлення NO<sub>2</sub> у забрудненому повітрі. Комбінація цих матеріалів посилює їх синергетичний ефект, причому велика площа поверхні 2D QC структури сприяє адсорбції газу та швидким реакціям, тоді як MoS<sub>2</sub> додає різні хімічні функції для вибіркового та чутливого виявлення NO<sub>2</sub>. Налаштовуючи склад нанокмпозиту, включаючи вибір сплаву та його розташування, можна адаптувати параметри продуктивності сенсорів, такі як чутливість, селективність і час відгуку. Для цього використовується гібридна композиція квазікристалічних нанопластівців Al<sub>70</sub>Co<sub>10</sub>Fe<sub>5</sub>Ni<sub>10</sub>Cu<sub>5</sub>і нанопластівців MoS<sub>2</sub>.

Загалом, унікальне поєднання властивостей, які демонструють високоентропійні матеріали, включаючи високотемпературну стабільність, механічну міцність, магнітні характеристики та електрохімічні характеристики, позиціонує їх як перспективні матеріали для широкого спектру застосувань сенсорів, пропонуючи потенційні досягнення в різних сферах.

### Література

1. Y. Kambarov, G. Uazyrkhanova, M. Rutkowska-Gorczyca, and A. Kussainov, "Overview of the high-entropy alloys concept," NNC RK Bulletin, pp. 25-39, 2023. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-25-39>.
2. Z. Wang and S. Zhang, "Research and Application Progress of High-Entropy Alloys," Coatings, vol. 13, p. 1916, 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13111916>.
3. B. Aravinth, G. Arumugam, and R. Mayildurai, "Fabrication of High Entropy Alloy by Powder Metallurgy Process," International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH), vol. 2, pp. 27-41, 2024. <https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2024.0005.i1>.

4. Y. Wu, P. Liaw, R. Li, W. Zhang, G. Geng, X. Yan, G. Liu, and Y. Zhang, "Relationship between the unique microstructures and behaviors of high-entropy alloys," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 31, pp. 1350-1363, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2777-4>.
5. Müller, F. (2021). Entwicklung und Charakterisierung neuartiger refraktärer Hochentropielegierungen für Hochtemperaturanwendungen. [Development and characterization of novel refractory high-entropy alloys for high-temperature applications].
6. Jishnu, V., Mishra, S. S., Mb, K. U., Thomas, S. P., Tiwary, C. S., Biswas, K., & Kamble, V. B. (2022). Highly sensitive and selective triethylamine sensing through high-entropy alloy (Ti-Zr-Cr-V-Ni) nanoparticle-induced fermi energy control of MoS<sub>2</sub> nanosheets. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(14), 13653–13664. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00158>.
7. Kumar, S., & Kumar, M. (2024). Utilizations of High Entropy Alloy Nanoparticles for Gas Sensors. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s41403-023-00447-2>.
8. Rajendrachari, S. (2022). An Overview of High-Entropy Alloys Prepared by Mechanical Alloying Followed by the Characterization of Their Microstructure and Various Properties. *Alloys*, 1, 116-134. <https://doi.org/10.3390/alloys1020008>.

### References

1. Y. Kambarov, G. Uazyrkhanova, M. Rutkowska-Gorczyca, and A. Kussainov, "Overview of the high-entropy alloys concept," *NNC RK Bulletin*, pp. 25-39, 2023. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-25-39>.
2. Z. Wang and S. Zhang, "Research and Application Progress of High-Entropy Alloys," *Coatings*, vol. 13, p. 1916, 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13111916>.
3. B. Aravinth, G. Arumugam, and R. Mayildurai, "Fabrication of High Entropy Alloy by Powder Metallurgy Process," *International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH)*, vol. 2, pp. 27-41, 2024. <https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2024.0005.i1>.
4. Y. Wu, P. Liaw, R. Li, W. Zhang, G. Geng, X. Yan, G. Liu, and Y. Zhang, "Relationship between the unique microstructures and behaviors of high-entropy alloys," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 31, pp. 1350-1363, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2777-4>.
5. Müller, F. (2021). Entwicklung und Charakterisierung neuartiger refraktärer Hochentropielegierungen für Hochtemperaturanwendungen. [Development and characterization of novel refractory high-entropy alloys for high-temperature applications].
6. Jishnu, V., Mishra, S. S., Mb, K. U., Thomas, S. P., Tiwary, C. S., Biswas, K., & Kamble, V. B. (2022). Highly sensitive and selective triethylamine sensing through high-entropy alloy (Ti-Zr-Cr-V-Ni) nanoparticle-induced fermi energy control of MoS<sub>2</sub> nanosheets. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(14), 13653–13664. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00158>.
7. Kumar, S., & Kumar, M. (2024). Utilizations of High Entropy Alloy Nanoparticles for Gas Sensors. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s41403-023-00447-2>.
8. Rajendrachari, S. (2022). An Overview of High-Entropy Alloys Prepared by Mechanical Alloying Followed by the Characterization of Their Microstructure and Various Properties. *Alloys*, 1, 116-134. <https://doi.org/10.3390/alloys1020008>.