

Структура та фізичні властивості швидкооохолодженого аморфного сплаву $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$

Олександр Кушнерьов , Валерій Башев , Сергій Рябцев 

Purpose. The study aims to develop and characterize a new nanostructured $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ high-entropy metallic glass with enhanced soft magnetic and mechanical properties. The research seeks to explore the interplay between the alloy's amorphous structure and its functional properties to advance the understanding of high-entropy metallic glasses. **Design / Method / Approach.** The amorphous films of the $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ alloy was synthesized using splat-quenching technique. The cooling rate, estimated based on the film thickness, was $\sim 10^6$ K/s. Structural properties were analyzed via X-ray diffraction (XRD), differential thermal analysis (DTA), and electrical resistivity measurements. Magnetic properties were assessed using a B–H curve tracer and vibrating sample magnetometer, while microhardness was measured with a PMT-3 tester. **Findings.** The alloy exhibits a fully glassy structure with a crystallite size of ~ 3 nm, low coercivity (40 A/m), high saturation magnetization ($74 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$), and microhardness ≥ 8000 MPa, indicating decent soft magnetic and mechanical properties. **Theoretical Implications.** The research provides significant insights into the role of atomic-size differences, configurational entropy, and thermodynamic parameters in stabilizing the glassy phase in high-entropy alloys. It advances the theoretical framework for designing high-entropy amorphous materials. **Practical Implications.** The characteristics of the material make it promising for use in electronic devices and mechanical engineering parts. **Originality / Value.** This study provides a comprehensive analysis of the high-entropy metallic glass $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$, offering new insights of its magnetic and mechanical properties through advanced characterization techniques. **Research Limitations / Future Research.** Further studies are needed to investigate the long-term stability of the fabricated amorphous alloy. **Article Type.** Applied Research.

Keywords:

multicomponent high-entropy alloy, metallic glass, amorphous film, relative electrical resistivity, soft magnetic properties, microhardness

Мета. Дослідження спрямоване на розробку та характеристику нового наноструктурованого високоентропійного металевго скла $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ з покращеними магнітними та механічними властивостями. Робота має на меті вивчити взаємозв'язок між аморфною структурою сплаву та його функціональними характеристиками для поглиблення розуміння високоентропійних аморфних сплавів. **Дизайн / Метод / Підхід.** Аморфні плівки сплаву $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ синтезовано за допомогою техніки надшвидкого охолодження. Швидкість охолодження, оцінена на основі товщини отриманих плівок була $\sim 10^6$ К/с. Структурні властивості досліджено за допомогою рентгенівської дифракції, диференціального термічного аналізу (ДТА) та вимірювань електричного опору. Магнітні властивості визначені за допомогою приладу для вимірювання кривих гістерезису та вібраційного магнітометра, а мікротвердість вимірюно тестером PMT-3. **Результати.** Сплав має повністю аморфну структуру з розміром кристаліта ~ 3 нм, низьку коерцитивну силу (40 А/м), високу намагніченість насичення ($74 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$) та мікротвердість ≥ 8000 МПа, що свідчить про хороші магнітні та механічні властивості. **Теоретичне значення.** Дослідження надає важливі дані про роль різниці в розмірах атомів, конфігураційної ентропії та термодинамічних параметрів у стабілізації аморфної фази у високоентропійних сплавах. Воно розширює теоретичну базу для розробки високоентропійних аморфних матеріалів. **Практичне значення.** Характеристики матеріалу роблять його перспективним для використання в електронних пристроях і деталях для машинобудування. **Оригінальність / Цінність.** Це дослідження пропонує всебічний аналіз високоентропійного аморфного сплаву $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ надаючи нові дані про його магнітні та механічні властивості завдяки застосуванню передових методів досліджень. **Обмеження дослідження / Майбутні дослідження.** Потрібні подальші дослідження, щоб дослідити довготривалу стабільність виготовленого аморфного сплаву. **Тип статті.** Прикладне дослідження.

Ключові слова:

багатокомпонентний високоентропійний сплав, металеве скло, аморфна плівка, відносний електричний опір, магнітні властивості, мікротвердість

Structure and physical properties of the rapidly cooled amorphous alloy $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$

Contributor Details:

Oleksandr Kushnerov, Cand. Sc., Assoc. Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, kushnrv@gmail.com

Valerii Bashev, Dr. Sc., Prof., Dniprovsky State Technical University: Kamianske, UA, bashev_vf@ukr.net

Serhii Ryabtsev, Dr. Sc., Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, siryabts@gmail.com

Received: 2025-04-30

Revised: 2025-05-17

Accepted: 2025-05-18



Copyright © 2025 Authors.

This work is licensed under a Creative

Commons Attribution 4.0 International License.

За останнє десятиліття новий клас матеріалів, відомий як багатокомпонентні високоентропійні сплави (БЕС) або багатокомпонентні концентровані сплави, привернув значну увагу дослідників. Такі сплави зазвичай містять від 5 до 13 елементів у рівноатомних або близьких до рівноатомних концентраціях (Miracle & Senkov, 2017; Brechtl & Liaw, 2021; Zhou et al., 2023). Правильний вибір кількості компонентів та їх концентрацій дозволяє отримати сплав з високою ентропією змішування, значення якої зберігається як у розплаві, так і після затвердіння. Під час кристалізації таких багатокомпонентних сплавів зазвичай утворюються прості тверді розчини заміщення з градецентрованою або об'ємноцентрованою кубічною кристалічною ґраткою через їх високу ентропію змішування. З іншого боку, можна отримати високоентропійні сплави зі структурою, в якій інтерметалічні сполуки з високою твердістю (фази Лавеса, σ -фаза) поєднуються з простим твердим розчином, що характеризується високою пластичністю. Багато високоентропійних сплавів мають унікальні властивості, такі як зносостійкість, стійкість до корозії та окислення, радіаційна стійкість, висока твердість і міцність (Biswas et al., 2022; Firstov et al., 2023; Girzhon et al., 2023; Karpov, 2024; Singh et al., 2024; Cheng et al., 2025; Xiao et al., 2025; Wang et al., 2025; Liu et al., 2025). Також слід відзначити чудову біосумісність, продемонстровану деякими БЕС (Lin et al., 2025). Таким чином, високоентропійні сплави можуть знайти застосування як матеріали для ядерних реакторів, медицини, електронних пристроїв, механічного обладнання, корпусів ракет і двигунів, при виготовленні зброї тощо (Hobhaydar et al., 2023; Park et al., 2025; Zatsama et al., 2024; Kaya et al., 2025).

На відміну від БЕС, аморфний металевий сплав, або так зване металеве скло, містить лише один, іноді два основні елементи. Високоентропійні сплави та металеві скла досліджувалися окремо, доки не були успішно синтезовані аморфні високоентропійні сплави. Такі сплави отримали назву високоентропійних металевих стеклов (ВЕМС). Високоентропійні металеві стекла (як це буває з речовинами, що одночасно належать до різних типів матеріалів (Akimov et al., 2006; Dudnik et al., 2001)) мають чудові фізичні та механічні властивості, поєднуючи переваги як металевих стеклов, так і високоентропійних сплавів. Таким чином, ВЕМС мають значний потенціал для різних технічних застосувань. Зокрема, металеві стекла зазвичай є хорошими магнітними матеріалами. Вони мають високу намагніченість насичення, низьку коерцитивну силу та втрати потужності. Вже було синтезовано цілий ряд ВЕМС систем (Li et al., 2017; Xu et al., 2018; Panahi et al., 2022).

Одним з найефективніших способів отримання нанокристалічних та аморфних металевих матеріалів є швидке гартування. Цей метод базується на надшвидкому охолодженні розплаву (зі швидкістю, що перевищує 10^4 К/с), що дозволяє отримувати у сплавах широкий спектр метастабільних структурних станів (Kushnerov et al., 2021, 2023; Bashev et al., 2023; Polonsky et al., 2024).

Мета

Дана робота присвячена розробці і дослідженню властивостей нового високоентропійного аморфного сплаву $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ який поєднує високу термічну стабільність з хорошими механічними та магнітними властивостями.

Матеріали та методи

Литі зразки БЕС $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ із номінальним хімічним складом, наведеним у табл. 1, були отримані за допомогою лабораторної печі Таммана із використанням мідної виливниці (швидкість охолодження $\sim 10^2$ К/с).

Таблиця 1 – Номінальний хімічний склад багатокомпонентного сплаву $\text{FeCo}_{0,854}\text{Nb}_{0,146}\text{NiB}_{0,7}\text{Si}_{0,3}$ (ат.%) (Джерело: розроблено авторами)

Fe	Co	Nb	Ni	B	Si
25	21,35	3,65	25	17,5	7,5

Для забезпечення однорідності зразки переплавлялися щонайменше тричі. Після цього частина зразків

використовувалася для виробництва загартованих з рідкого стану (ЗРС) плівок методом splat-охолодження (splat-quenching). Цей метод полягає в розмазуванні краплі розплаву, яка вистрелювалася струменем інертного газу (аргону) під високим тиском, по внутрішній поверхні мідного циліндра, що обертався з високою швидкістю (~ 8000 об/хв). Швидкість охолодження оцінювалася за формулою

$$V = \frac{\alpha \theta}{c \rho \delta}, \quad (1)$$

де c – теплоємність плівки, ρ – густина сплаву, α – коефіцієнт тепловіддачі, θ – надлишкова температура (різниця між температурою розплаву та температурою поверхні мідного циліндра), а δ – товщина плівки (Bashev et al., 2023; Polonsky et al., 2024). Використавши дані з (Gale & Totemeier, 2004), та дані з табл.1, теплоємність сплаву можемо оцінити як $c \approx 550$ Дж/(кг·К), а приблизне значення густини $\rho \approx 7000$ кг/м³. За даними (Tkatch et al., 1997, 2002, 2009) можна приблизно оцінити мінімальне значення коефіцієнту тепловіддачі для сплаву подібного складу при splat-охолодженні $\approx 2,8 \cdot 10^5$ Вт/(м²·К). Оскільки товщина отриманих плівок становила ~ 40 мкм, початкова температура розплаву ~ 2000 К, а температура мідного циліндра ~ 300 К, розрахована за формулою (1) початкова швидкість охолодження становить $\sim 3 \cdot 10^6$ К/с. При подальшому охолодженні розплаву на поверхні циліндра різниця температур та відповідно швидкість охолодження буде знижуватися, забезпечуючи середню швидкість охолодження на рівні $\sim 10^6$ К/с.

Рентгенофазовий аналіз зразків і плівок проводився на дифрактометрі ДРОН-2.0 з використанням монохроматизованого $\text{Cu K}\alpha$ випромінювання. Температурні залежності питомого електричного опору плівки вимірювали чотириточковим методом при безперервному нагріванні та подальшому охолодженні у високому вакуумі з тиском $4 \cdot 10^{-2}$ Па. Швидкість нагрівання від кімнатної температури до ~ 1010 К становила 0,2 К/с. Відпалені плівки використовували для структурних досліджень методом рентгеноструктурного аналізу (з фотографічною реєстрацією, в дебаєвській камері на дифрактометрі УРС-2.0 у фільтрованому $\text{Co K}\alpha$ випромінюванні). Дебаєграми були мікрофотометровані, оцифровані та оброблені за допомогою програмного забезпечення для якісного фазового аналізу QualX2 (Altomare et al., 2017).

Термічну поведінку аморфних плівок вивчали методом диференціального термічного аналізу (ДТА) при швидкості нагрівання 0,2 К/с. Коерцитивну силу вимірювали при кімнатній температурі за допомогою приладу для вимірювання кривих гістерезису. Петлі гістерезису зразків отримували при кімнатній температурі за допомогою приладу для вимірювання кривих гістерезису у змінному магнітному полі із частотою 50 Гц та напруженістю до 16000 А/м та вібраційного магнітометра ВМ-1 у магнітному полі напруженістю до 560000 А/м, прикладеному паралельно до площини плівки. Мікротвердість вимірювалася на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 100г.

Результати та їх обговорення

Існує два основних критерії, за якими зазвичай характеризують високоентропійні сплави. Це конфігураційна ентропія змішування ΔS_{mix} та ентальпія змішування ΔH_{mix} . Однак для прогнозування фазового складу БЕС було запропоновано деякі додаткові параметри (Miracle & Senkov, 2017; Dufanets et al., 2020; Krapivka et al., 2015; Gorban et al., 2022, 2023; Brechtl & Liaw, 2021; Biswas et al., 2022; Zhou et al., 2023). До них, зокрема, належать концентрація валентних електронів (VEC), термодинамічний параметр Ω , який враховує температуру плавлення, ентропію змішування та ентальпію змішування. Важливим параметром є різниця в розмірах атомів між компонентами сплаву, позначена як δr .

Ентропія змішування компонентів ΔS_{mix} визначається як

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i, \quad (2)$$

де c_i – атомна частка елемента із номером i ; R – універсальна газова стала.

Ентальпія змішування ΔH_{mix} визначається з рівняння

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i,j=1, i \neq j}^n \omega_{ij} c_i c_j, \quad (3)$$

де $\omega_{ij} = 4\Delta H_{mix}^{AB} \cdot \Delta H_{mix}^{AB}$ – ентальпія змішування для бінарного

сплаву елементів А та В у рідкому стані.

Параметр Ω визначається як

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{|\Delta H_{mix}|}, \quad (4)$$

де T_m – середня температура плавлення сплаву з n компонентів:

$$T_m = \sum_{i=1}^n c_i (T_m)_i, \quad (5)$$

Різницю в розмірах атомів між компонентами сплаву можна охарактеризувати наступним параметром:

$$\delta r = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i (1 - r_i/\bar{r})^2}, \quad (6)$$

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i, \quad (7)$$

де r_i – атомний радіус елемента із номером i .

Концентрація валентних електронів у розрахунку на один атом (VEC) визначається за формулою:

$$VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i, \quad (8)$$

де $(VEC)_i$ – концентрація валентних електронів (з урахуванням d -електронів) для елемента із номером i .

Останнім часом було виявлено, що топологічна нестабільність атомного пакування також залежить від різниці в розмірах атомів (Miracle & Senkov, 2017; Brechtel & Liaw, 2021; Biswas et.al., 2022; Zhou et.al., 2023). Було висловлено припущення що атоми з максимальним і мінімальним радіусами відіграють вирішальну роль у визначенні стабільності пакування у ВЕС та запропоновано новий параметр для кількісного опису викривлення кристалічної решітки при утворенні сплаву:

$$\gamma = \frac{\omega_S}{\omega_L}, \quad (9)$$

$$\omega_S = 1 - \sqrt{\frac{(r_S + \bar{r})^2 - \bar{r}^2}{(r_S + \bar{r})^2}}, \quad (10)$$

$$\omega_L = 1 - \sqrt{\frac{(r_L + \bar{r})^2 - \bar{r}^2}{(r_L + \bar{r})^2}}. \quad (11)$$

Тут ω_S та ω_L – тілесні кути пакування для атомів відповідно з найменшим радіусом r_S та найбільшим радіусом r_L . Значення $\gamma = 1.175$ є межею між металевими стеклами або сплавами з інтерметалічними сполуками та простими твердими розчинами.

Різниця електронегативностей компонентів сплаву також є одним із параметрів, який використовується для прогнозування фазового складу ВЕС. У роботі (Poletti & Battezzati, 2014) використовуються електронегативності визначені за шкалою Аллена:

$$\delta \chi^A = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i (1 - \frac{\chi_i^A}{\chi^A})^2}, \quad (12)$$

$$\chi^A = \sum_{i=1}^n c_i \chi_i^A, \quad (13)$$

де χ^A – середня електронегативність Аллена для сплаву, χ_i^A – електронегативність елемента із номером i .

Використовуючи дані з (Takeuchi & Inoue, 2005; Miracle & Senkov, 2017), ми розрахували ΔS_{mix} , ΔH_{mix} , δr , VEC , Ω , γ та χ^A для сплаву $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ (табл. 2).

Таблиця 2 – Електронні, термодинамічні та розмірні параметри багатокомпонентного сплаву $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ (Джерело: розроблено авторами)

ΔS_{mix} Дж/(моль·К)	ΔH_{mix} кДж/моль	δr , %	VEC	Ω	γ	$\delta \chi^A$, %
13,653	-26,295	14,29	7,439	0,987	1,7846	6,563

Відповідно до (Miracle & Senkov, 2017; Brechtel & Liaw, 2021; Zhou et.al., 2023), високоентропійні металеві стекла можуть формуватися, коли ΔS_{mix} , ΔH_{mix} і δ одночасно задовольняють наступні умови: $7 \leq \Delta S_{mix} \leq 16$ J/(mol·K), $-49 \leq \Delta H_{mix} \leq -5.5$ kJ/mol і $\delta \geq 9$. Іншою умовою, що вказує на можливість формування металевого скла або інтерметалічних сполук, є значення параметра $\Omega \leq 1.1$. Також різниця електронегативностей $\delta \chi^A$ повинна перевищувати 6 %. Як видно з табл. 2, сплав $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ повністю відповідає всім зазначеним умовам, а ΔS_{mix} , ΔH_{mix} , δ , Ω , γ та χ^A є належними параметрами для прогнозування фазового складу високоентропійних

сплавів. Різниця в розмірах атомів δ є одним із найважливіших параметрів, що визначають формування твердого розчину або аморфної фази у ВЕС. Значення δ має бути достатньо великим, щоб забезпечити достатній стрес на атомному рівні, який необхідний для дестабілізації фази твердого розчину. Крім того, для обмеження довготривалої атомної дифузії та підвищення ефективності локального пакування також необхідні негативне значення ΔH_{mix} і велике δ . Виконання цих умов призводить до високої здатності до формування скла та забезпечує придушення формування кристалічної фази при охолодженні.

Слід зазначити, що вищенаведені значення параметрів, які характеризують ВЕС $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$, відповідають також критеріям, які виконуються для сплавів, у яких мають бути наявні інтерметалічні фази. Тому варто відмітити, що правила проектування ВЕС, що базуються на основі статистичних результатів або усереднених даних щодо термодинамічних властивостей, електронної структури та розмірних параметрів атомів, що утворюють сплав насправді є необхідними, але не достатніми умовами. Сама по собі термодинаміка не може повністю передбачити фазовий склад ВЕС, необхідно також враховувати кінетику процесу фазоутворення. Тому дуже важливу роль відіграє швидкість охолодження розплаву.

Параметри кристалічної ґратки та фазовий склад досліджуваного сплаву (табл. 3) визначали за допомогою рентгенофазового аналізу (рис. 1, 2).

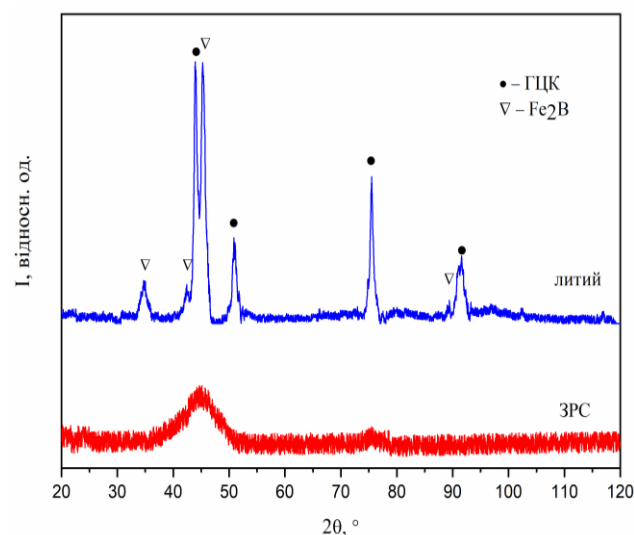


Рисунок 1 – Дифрактограми литих та ЗРС зразків сплаву $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ (Джерело: Створено авторами)

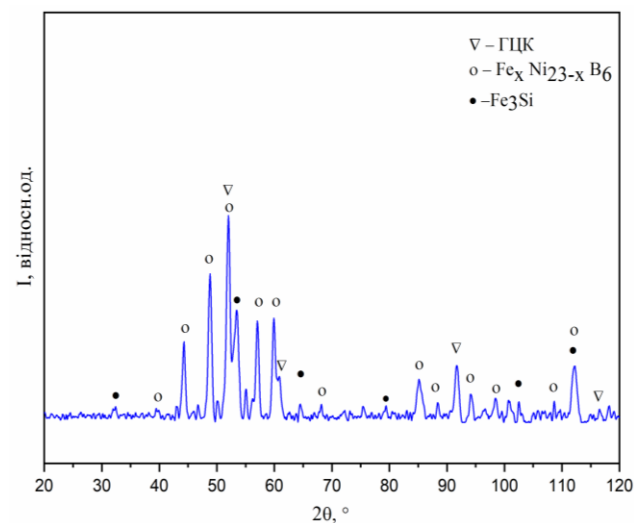


Рисунок 2 – Дифрактограма ЗРС півки $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ після відпаду до ~ 1010 К (Джерело: Створено авторами)

За результатами рентгенофазового аналізу можна стверджувати, що сплав $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ у литому стані

містить гранецентровану кубічну фазу та фазу Fe₂B. Параметри ґратки гранецентрованої кубічної фази свідчать, що вона формується на основі γ-заліза (параметр ґратки γ-заліза був екстрапольований при кімнатній температурі як 0,3572 нм).

Таблиця 3 – Фазовий склад сплаву FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3}
(Джерело: розроблено авторами)

Сплав	Фазовий склад
Литий зразок FeCo _{0,854} Nb _{0,146} NiB _{0,7} Si _{0,3}	ГЦК ($a=0,3574$ нм) + Fe ₂ B
ЗРС плівка FeCo _{0,854} Nb _{0,146} NiB _{0,7} Si _{0,3}	Аморфна фаза
ЗРС плівка FeCo _{0,854} Nb _{0,146} NiB _{0,7} Si _{0,3} після відпау	ГЦК ($a=0,3527$ нм) + Fe _x Ni _{23-x} B ₆ + Fe ₃ Si

Для ЗРС плівок сплаву FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3} дифрактограма не містить чітких дифракційних максимумів, характерних для кристалів, а лише широкий розмитий максимум. Це є ознакою повністю аморфної структури. Розмір області когерентного розсіювання (розмір кристаліту), оцінений за формулою Селякова-Шеррера, становить ~3 нм. Після відпау до ~1010 K (вище температури кристалізації) та подальшого повільного охолодження плівки кристалізуються з утворенням кількох кристалічних фаз (табл. 3). Значно складніший фазовий склад, що спостерігається у відпалених плівках порівняно з литими зразками, очевидно, пояснюється їх низькою швидкістю охолодження. В результаті у відпалених плівках формується значно більш рівноважна багатозерна структура, у якій наявні інтерметалічні фази. Присутній також простий твердий розчин типу ГЦК, який за визначенням має бути основною фазою для високоентропійного сплаву, містячи у собі усі складові елементи (окрім тих, що виділилися у складі інтерметалічних фаз).

Рисунок 3 показує криву ДТА аморфної ЗРС плівки сплаву FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3}. Крива містить явну стадію склування, після якої йде область переохолодженої рідини, а потім екзотермічний пік, що вказує на кристалізацію. Ця поведінка свідчить про аморфну природу зразка. Температура склування T_g та початкова температура кристалізації T_x позначені стрілками і дорівнюють 800 K та 863 K відповідно. Враховуючи, що на кривій ДТА видно лише один екзотермічний пік, кристалізація відбувається в один етап.

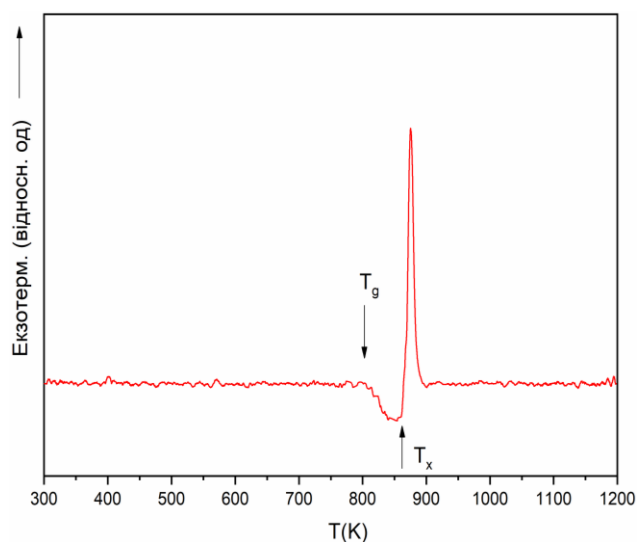


Рисунок 3 – Крива ДТА ЗРС плівки сплаву FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3} (Джерело: Створено авторами)

Розглянемо залежність відносного електричного опору наноструктурованих плівок $R(T)/R_0(300\text{ K})$. Початок незворотного зменшення опору під час нагрівання вказує на виникнення деяких фазових перетворень у плівці. Як видно з рис. 4, температура фазового перетворення (температура кристалізації) у плівці FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3} становить ~869 K. Це значення добре узгоджується зі значенням, отриманим з ДТА. Водночас наявність вигинів на кривій у регіоні фазового перетворення вказує на утворення кількох кристалічних фаз. Після завершення процесу кристалізації залежність опору від температури має звичайний характер, коли опір зменшується зі зниженням температури.

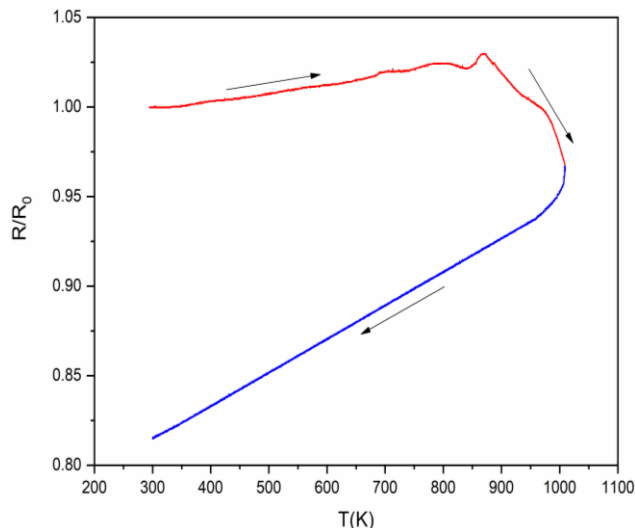


Рисунок 4 – Температурна залежність відносного електричного опору ЗРС плівки сплаву FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3} (Джерело: Створено авторами)

На рис. 5 показані петлі феромагнітного гістерезису литих та ЗРС зразків сплаву FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3}. Відповідно до виміряних значень коерцитивної сили H_c (табл. 4), ЗРС плівка є типовим магнітним матеріалом, тоді як коерцитивна сила литого НЕА приблизно в 30 разів більша.

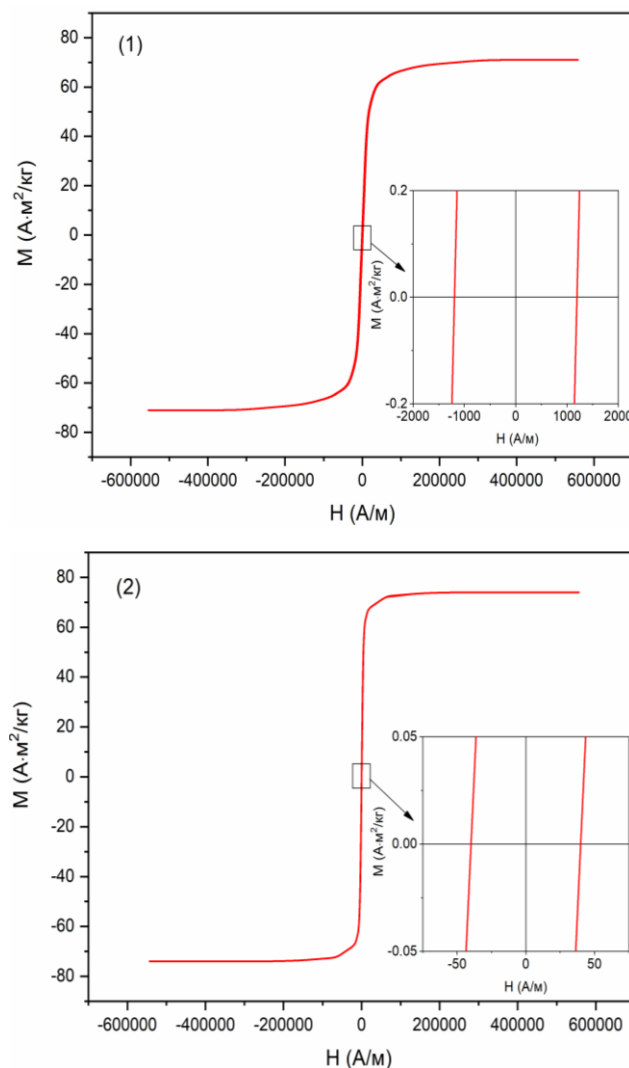


Рисунок 5 – Петлі магнітного гістерезису литого (1) та ЗРС (2) зразків сплаву FeCo_{0,854}Nb_{0,146}NiB_{0,7}Si_{0,3} (Джерело: Створено авторами)

Таким чином, перехід сплаву $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ з кристалічного до аморфного стану призводить до зміни магнітних характеристик від магнітотвердих до магнітом'яких. Низьке значення коерцитивної сили високоентропійного металевих скла з високим ступенем структурної однорідності та аморфності можна пояснити незначною щільністю центрів закріплення доменних стінок. Така поведінка є типовою для сплавів у наноструктурованому аморфному стані. Порівнюючи отримані результати із результатами для сплавів із подібним складом (Li et.al., 2017; Xu et.al., 2018), можна стверджувати, що додавання Nb практично не змінює значення намагніченості M_s , але сприяє збільшенню H_c . В той же час температура склування T_g також збільшується.

Таблиця 4 – Намагніченість насичення (M_s), коерцитивна сила (H_c) та мікротвердість (H_p) сплаву $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ (Джерело: розроблено авторами)

Сплав	M_s , А·м ² /кг	H_c , А/м	H_p , МПа
Литий зразок $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$	71±7	1200±100	9000±400
ЗРС плівка $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$	74±7	40±4	8500±400

Як литі, так і ЗРС зразки сплаву $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ демонструють високі значення мікротвердості (табл. 4), що

вказує на хороші механічні властивості сплавів. Очевидно, що наявність крихкої фази Fe_2B , яка має високу твердість, є причиною вищих значень мікротвердості, що спостерігаються в литому кристалічному сплаві. Водночас, однорідне швидкоохолоджене металеве скло без таких включень є більш пластичним, але має більш низьку мікротвердість.

Висновки

Із застосуванням технології splat-охолодження був отриманий наноструктурований високоентропійний аморфний сплав $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$. Температура склування T_g та початкова температура кристалізації T_x сплаву становлять 800 К та 863 К відповідно. Сплав $\text{FeCo}_{0.854}\text{Nb}_{0.146}\text{NiB}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ демонструє високе значення намагніченості насичення 74 А·м²/кг, низьку коерцитивну силу 40 А/м та високе значення мікротвердості ≥ 8000 МПа. Таким чином, отримане магнітом'яке високоентропійне металеве скло з підвищеною температурою склування може бути використане як функціональний матеріал, що поєднує добрі механічні та магнітні властивості, зокрема для виготовлення компонентів електротехнічного та електронного обладнання, що працює в умовах підвищених температур: трансформаторів, дроселів, магнітних екранів та спеціалізованих датчиків з термостабільними магнітними характеристиками.

References

- Akimov, S. V., Duda, V. M., Dudnik, E. F., Kushnerev, A. I., & Tomchakov, A. N. (2006). Secondary ferroic properties of partial mixed ferroelectric ferroelastics. *Physics of the Solid State*, 48(6), 1073–1076. <https://doi.org/10.1134/S1063783406060175>
- Altomare, A., Corriero, N., Cuocci, C., Falcicchio, A., Moliterni, A., & Rizzi, R. (2017). Main features of QUALX2.0 software for qualitative phase analysis. *Powder Diffraction*, 32(S1), S129–S134. <https://doi.org/10.1017/S0885715617000240>
- Bashev, V. F., Kushnerov, O. I., & Ryabtsev, S. I. (2023). Structure and properties of CoCrFeNiMnBe high-entropy alloy films obtained by melt quenching. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 765(1), 145–153. <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2215125>
- Biswas, K., Gurao, N. P., Maiti, T., & Mishra, R. S. (2022). *High Entropy Materials. Processing, Properties, and Applications*. Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-3919-8>
- Brechtl, J., & Liaw, P. K. (2021). *High-Entropy Materials: Theory, Experiments, and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77641-1>
- Cheng, H., Luo, H., Fan, C., Wang, X., & Li, C. (2025). Accelerated design of high-entropy alloy coatings for high corrosion resistance via machine learning. *Surface and Coatings Technology*, 502, 131978. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131978>
- Dudnik, E. F., Duda, V. M., & Kushnerov, A. I. (2001). Second-order ferroic properties of a Pb5Ge3O11 uniaxial ferroelectric. *Physics of the Solid State*, 43(12), 2280–2283. <https://doi.org/10.1134/1.1427957>
- Dufanets, M., Sklyarchuk, V., Plevachuk, Y., Kulyk, Y., & Mudry, S. (2020). The Structural and Thermodynamic Analysis of Phase Formation Processes in Equiatomic AlCoCuFeNiCr High-Entropy Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(11), 7321–7327. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05250-6>
- Firstov, G. S., Koval, Y. M., Filatova, V. S., Odnosum, V. V., Gerstein, G., & Maier, H. J. (2023). Development of high-entropy shape-memory alloys: structure and properties. *Progress in Physics of Metals*, 24(4), 819–837. <https://doi.org/10.15407/UFM.24.04.819>
- Gale, W. F., & Totemeier, T. C. (Eds.). (2004). *Smithells metals reference book* (8th ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075067509-3/50003-8>
- Girzhon, V., Yemelianchenko, V., & Smolyakov, O. (2023). High entropy coating from AlCoCrCuFeNi alloy, obtained by laser alloying. *Acta Metallurgica Slovaca*, 29(1), 44–49. <https://doi.org/10.36547/ams.29.1.1710>
- Gorban, V. F., Firstov, S. O., Krapivka, M. O., Samelyuk, A. V., & Kurylenko, D. V. (2022). Influence of Various Factors on the Properties of Solid-Soluble High-Entropy Alloys Based on BCC and FCC Phases. *Materials Science*, 58(1), 135–140. <https://doi.org/10.1007/S11003-022-00641-7>
- Gorban, V. F., Firstov, S. A., & Krapivka, M. O. (2023). The Influence of Different Factors on Physicomechanical Properties of High Entropy Alloys with fcc Lattice. *Materials Science*, 59(2), 145–151. <https://doi.org/10.1007/S11003-024-00755-0>
- Hobhaydar, A., Wang, X., Wang, Y., Li, H., Van Tran, N., & Zhu, H. (2023). Effect of tungsten doping on the irradiation resistance of FeCrV-based refractory medium entropy alloy for potential nuclear applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 966, 171635. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171635>
- Karpov, S. (2024). Application of high-entropy alloys in hydrogen storage technology. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2024(2), 48–61. <https://doi.org/10.46813/2024-150-048>
- Kaya, F., Aliakbarlu, S., Dizdar, K. C., Selimoğlu, G. İ., & Derin, B. (2025). Thermochemical Modeling-Assisted Synthesis of AlxCoCrFeNiMn (0.5 ≤ x ≤ 3) High-Entropy Alloys via Combustion Method for Soft Magnetic Applications. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/S42461-025-01204-5>
- Krapivka, N. A., Firstov, S. A., Karpets, M. V., Myslivchenko, A. N., & Gorban', V. F. (2015). Features of phase and structure formation in high-entropy alloys of the AlCrFeCoNiCu x system (x = 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0). *The Physics of Metals and Metallography*, 116(5), 467–474. <https://doi.org/10.1134/S0031918X15030084>
- Kushnerov, O. I., Bashev, V. F., & Ryabtsev, S. I. (2021). Structure and Properties of Nanostructured Metallic Glass of the Fe–B–Co–Nb–Ni–Si High-Entropy Alloy System. *Springer Proceedings in Physics*, 246, 557–567. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6_38
- Kushnerov, O. I., Ryabtsev, S. I., & Bashev, V. F. (2023). Metastable states and physical properties of Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy thin films. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 750(1), 135–143. <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2073043>
- Li, Y., Zhang, W., & Qi, T. (2017). New soft magnetic Fe25Co25Ni25(P, C, B)25 high entropy bulk metallic glasses with large supercooled liquid region. *Journal of Alloys and Compounds*, 693, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.144>
- Lin, M., Xiao, X., Xu, C.-H., Lu, W., Zhang, Y., & Liao, W. (2025). A nanostructured TiZrNbTaMo high-entropy alloy thin film with exceptional corrosion properties for biomedical application. *Applied Surface Science*, 684, 161859. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2024.161859>
- Liu, X., Liu, J., Zhou, C., Jiang, Z., Dong, W., An, X., Wei, W., Wang, D., Guan, S., & Feng, S. (2025). Achieving 2.1 GPa ultrahigh strength in a light-weight eutectic high-entropy alloy with dual heterogeneous structures. *Materials Characterization*, 222, 114812. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2025.114812>
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Panahi, S. L., Fornell, J., Popescu, C., Pineda, E., Sort, J., & Bruna, P. (2022). Structure, mechanical properties and nanocrystallization of (FeCoCrNi)-(B,Si) high-entropy metallic glasses. *Intermetallics*, 141, 107432. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107432>
- Park, H., Son, S., Ahn, S. Y., Ha, H., Kim, R. E., Lee, J. H., Joo, H. M., Kim, J. G., & Kim, H. S. (2025). Hyperadaptor; Temperature-insensitive tensile properties of Ni-

- based high-entropy alloy a wide temperature range. *Materials Research Letters*, 13(4), 348–356. <https://doi.org/10.1080/21663831.2025.2457346>
- Poletti, M. G., & Battezzati, L. (2014). Electronic and thermodynamic criteria for the occurrence of high entropy alloys in metallic systems. *Acta Materialia*, 75, 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.033>
- Polonsky, V. A., Kushnerov, O. I., Bashev, V. F., & Ryabtsev, S. I. (2024). The influence of the cooling rate on the structure and corrosion properties of the multicomponent high-entropy alloy CoCrFeMnNiBe. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(3), 506–512. <https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.506-512>
- Singh, A., Kumari, P., Sahoo, S. K., & Shahi, R. R. (2024). Studies on hydrogen storage properties of TiVFeNi, (TiVFeNi)₉₅Zr₅ and (TiVFeNi)₉₀Zr₁₀ high entropy alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.064>
- Takeuchi, A., & Inoue, A. (2005). Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference, Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element. *Materials Transactions*, 46(12), 2817–2829. <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.2817>
- Tkatch, V. I., Denisenko, S. N., & Beloshov, O. N. (1997). Direct measurements of the cooling rates in the single roller rapid solidification technique. *Acta Materialia*, 45(7), 2821–2826. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00377-1)
- Tkatch, V. I., Grishin, A. M., & Maksimov, V. V. (2009). Estimation of the heat transfer coefficient in melt spinning process. *Journal of Physics: Conference Series*, 144, 012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/144/1/012104>
- Tkatch, V. I., Limanovskii, A. I., Denisenko, S. N., & Rassolov, S. G. (2002). The effect of the melt-spinning processing parameters on the rate of cooling. *Materials Science and Engineering: A*, 323(1–2), 91–96. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01346-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01346-6)
- Xiao, X., Zhang, J. W., Feng, C. S., Yu, H., & Liao, W. B. (2025). Design of low-activation refractory high-entropy alloys with improved plasticity. *Applied Physics Letters*, 126(12). <https://doi.org/10.1063/5.0258818>
- Xu, Y., Li, Y., Zhu, Z., & Zhang, W. (2018). Formation and properties of Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅(P, C, B, Si)₂₅ high-entropy bulk metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 487, 60–64. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.02.021>
- Wang, H., Jiang, B., He, H., Fu, G., Sun, B., Liu, X., Zhang, S., Gao, Z., Meng, X., & Yi, X. (2025). Microstructural features and functional properties of NiCuTiZrAl high entropy shape memory alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 1875–1890. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.243>
- Zatsama, O., Kotrechko, S., Filatov, O., Bondarchuk, V., Firstov, G., & Dubinko, V. (2024). Phenomenon of ignition and explosion of high-entropy alloys of systems Ti-Zr-Hf-Ni-Cu, Ti-Zr-Hf-Ni-Cu-Co under quasi-static compression. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 18(68), 410–421. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.68.27>
- Zhou, Y., Xiang, H., & Dai, F.-Z. (2023). *High-Entropy Materials* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527837205>