

Белоконь Юрій Олександрович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-9327-5219

Шапуров Олександр Олександрович, професор, доктор економічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4381-4886

Гречаний Олексій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-0524-4998

Проценко Віктор Максимович, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-5148-0361

ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ: СУЧАСНИЙ СТАН І МАЙБУТНІ НАПРЯМКИ

У статті досліджено концептуальні засади високоентропійних сплавів (ВЕС) та різноманітні технології їх отримання. Аналіз традиційних металургійних методів, таких як дугове та індукційне плавлення, засвідчив їхню ефективність у забезпеченні однорідності матеріалу, водночас наголошено на обмежених можливостях щодо точного контролю мікроструктури. Порошкова металургія забезпечує рівномірний розподіл елементів, проте характеризується високими енергетичними витратами. Альтернативні методи, зокрема лазерне сплавлення та осадження з парової фази, відкривають нові перспективи в управлінні структурою сплавів, однак їхнє масштабування ускладнене через вартість обладнання та низьку продуктивність.

Визначено ключові технічні виклики, що гальмують розвиток виробництва ВЕС, зокрема труднощі контролю мікроструктури, нерівномірність розподілу компонентів та значні енергетичні витрати. Для їх подолання запропоновано поєднання традиційних і сучасних методів, а також використання чисельного моделювання для оптимізації виробничих процесів. Вдосконалені підходи до проектування сплавів базуються на фізико-хімічному аналізі компонентів і враховують специфіку експлуатаційних умов.

Розглянуто сучасні методи контролю мікроструктури та механічних характеристик ВЕС. Використання технологій лазерного сплавлення, електроімпульсного спікання та осадження з парової фази сприяє точнішому регулюванню параметрів матеріалів і зменшенню дефектності. Додатково наголошено на важливості розробки нових підходів до контролю фазових перетворень, що сприятиме прогнозованому формуванню структури сплавів.

Розглянуто перспективи масштабування виробництва ВЕС, акцентуючи увагу на необхідності подальших досліджень для підвищення продуктивності та зниження витрат. Запропоновано стратегічні напрями інтеграції ВЕС у промислові галузі, включаючи авіаційну, енергетичну та медичну сфери.

Запропоновано комплексний підхід до виробництва ВЕС, який включає прототипування, тестування та адаптацію технологічних процесів відповідно до промислових вимог. Оцінено потенціал різних методів виробництва з огляду на їхню економічну ефективність та технічну доцільність.

Таким чином, проведене дослідження сприяє поглибленню знань про виробництво ВЕС, що дозволить розширити їхнє застосування у високотехнологічних галузях промисловості.

Ключові слова: високоентропійні сплави, синтез, порошкова металургія, лазерне сплавлення, 3D-друк, механічні характеристики.

Вступ. Високоентропійні сплави (ВЕС) є новітнім напрямом у матеріалознавстві, який привертає увагу завдяки своїм унікальним властивостям. Однак незважаючи на

значний науковий інтерес, існують певні упущення в наукових доробках, які потребують подальших розробок. Однією з основних проблем є відсутність єдиного стандарту методів виробництва ВЕС, а також недостатньо детальне розуміння впливу різних технологій синтезу на кінцеві властивості матеріалів. Це створює труднощі у виробничому процесі, а також обмежує можливості їх широкого впровадження у масове промислове виробництво.

Мотивацією для проведення цього дослідження є необхідність удосконалення існуючих методів синтезу ВЕС, виявлення їхніх недоліків та розробка нових підходів. Наукова новизна статті полягає в розробці науково-практичного підходу до виробництва високоентропійних сплавів, що включає порівняння традиційних і нетрадиційних методів їх виготовлення, аналіз їхніх переваг і недоліків, а також визначення оптимальних шляхів удосконалення технологій. Отримані результати можуть стати основою для широкомасштабного впровадження цих матеріалів у різні галузі промисловості.

Стаття присвячена дослідженню концептуальних основ та технологічних аспектів високоентропійних сплавів (ВЕС), різноманітним методам їх синтезу. Основними завданнями є:

1. Оцінка існуючих методів виробництва ВЕС і їх оптимізація з точки зору енергетичної та економічної ефективності.
2. Визначення основних технічних прогалин, що виникають при виробництві ВЕС, та розробка шляхів їх усунення.
3. Аналіз технологій, що забезпечують високу точність у контролі мікроструктури та механічних властивостей сплавів.
4. Оцінка можливості масштабування впроваджених методів у промислове виробництво.
5. Розробка пропозицій для вдосконалення концепції виробництва ВЕС із урахуванням останніх наукових досягнень у галузі матеріалознавства.
6. Інтеграція науково-технічних аспектів в концепцію виробництва ВЕС.
7. Оцінка потенціалу різних методів у контексті специфічних промислових потреб.

В статті сформовано розуміння технологічних процесів, таких як лазерне сплавлення та осадження з парової фази, що дозволяє значно підвищити точність контролю над складом і мікроструктурою високоентропійних сплавів (ВЕС), забезпечуючи тим самим їхні унікальні механічні характеристики, які відповідають вимогам сучасних технологій, а також дозволяє інтегрувати новітні методи виготовлення в промислове виробництво, зокрема, шляхом покращення контролю температурних і фазових змін у процесі. Крім того, вдосконалено методи проектування сплавів, що базуються на глибокому аналізі їх властивостей та взаємодії матеріалів, враховуючи сучасні вимоги до їх стійкості в умовах агресивних середовищ та підвищених навантажень, що безпосередньо впливає на розвиток інженерних рішень і підвищення ефективності виробничих процесів. Подальшого розвитку набув концептуальний підхід до виробництва ВЕС, що включає не лише розробку технології, а й складний процес прототипування, тестування та масштабування виробництва, де кожен етап орієнтований на інтеграцію інноваційних методів матеріалознавства та точного моделювання властивостей матеріалу, що дозволяє створювати високо технологічні рішення для різних галузей промисловості, зокрема у створенні компонентів для авіації, енергетики та інших високотехнологічних виробництв, де точність, надійність та довговічність матеріалів є критично важливими.

Аналіз досліджень. Дослідженням методів синтезу високоентропійних сплавів займалися наступні науковці: Cao Y., Cheng W., Huang L., Liu S., Pan X., Peng C., Zhao S.

Shaopeng Liu, Hongbo Li, Ke Sun, Han Zhang та Mingxue Shen дослідили мікроструктуру, механічні та трибологічні властивості сплаву CoCrFeMnNi, виготовленого методом L-PBF. Ними встановлено, що збільшення потужності лазера від 120 Вт до 180 Вт сприяє ущільненню матеріалу, збільшує діаметр клітин і змінює текстуру кристалів. Тертя і знос залежать від мікротвердості, а основними механізмами зношування є абразивний, втомний, окислювальний та адгезійний знос[1].

Wei Cheng, Lingfei Ji, Litian Zhang, Hao Wang і Weigao Sun довели доцільність лазерних технологій виготовлення RHEA, які дозволяють створювати масивні структури та покриття. Встановлено, що багатошарове лазерне виготовлення з варіацією

елементного складу прискорює розробку матеріалів. Швидкий термічний цикл сприяє формуванню дрібнозернистої структури та покращує механічні властивості. Однак лазерні методи мають обмеження, пов'язані з дефектами, що впливають на довговічність сплавів у складних умовах [2].

Заслуговує на увагу дослідження Cong Peng та ін. Науковці експериментальним шляхом отримали $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ HEA, виготовлений методом селективного електронно-променевого плавлення (SEBM). Сплав продемонстрував високу міцність (2048 МПа) і пластичність (12%) за кімнатної температури. Виявлено анізотропію механічних властивостей та вплив мікроструктури на твердість. Дослідження підкреслює перспективність SEBM для отримання високоміцних HEA з контрольованими фазовими структурами [3].

Наукова праця Yue Cao та ін присвячена виявленню механізмів деформації та їхньому впливу на механічні властивості метастабільних високоентропійних сплавів TiZrHfNb_x , що є важливим для інженерних застосувань. Дослідники розробили серію метастабільних RHEA із різним вмістом Nb та систематично дослідили їхні характеристики на розтяг і трибологічні властивості при 500 °C. Результати експериментів показали, що сплав $\text{TiZrHfNb}_{0.4}$ має чудові характеристики розтягування (межа плинності 445 МПа, міцність на розрив 937 МПа, відносне подовження 58,5%), тоді як $\text{TiZrHfNb}_{0.2}$ демонструє найнижчий коефіцієнт тертя та мінімальний об'єм зносу. Аналіз механізмів деформації виявив, що для розтягування домінуючими факторами є формування деформаційних смуг, фазові перетворення та утворення смуг ковзання. У трибологічних випробуваннях було встановлено, що низькокутові межі зерен і нанокристалічний шар сприяють зменшенню коефіцієнта тертя та зносу [4].

Стаття [5] розкриває дослідження щодо впливу температури спікання на характеристики високоентропійних сплавів (RHEA), зокрема WNbTaV . Зазначено, що ці сплави мають великі перспективи для застосування у високотемпературних конструкційних і бронебійних матеріалах. У дослідженні використано методи кульового помелу і іскрового плазмового спікання (SPS). Виявлено, що сплави спечені при температурі від 1300 °C до 1600 °C мають дві основні фази: збагачену W(Ta) та збагачену Nb(V), що взаємодіють і визначають механічні властивості сплаву. Зміна температури спікання суттєво впливає на еволюцію мікроструктури і механізм зміцнення. Для зразків, спечених при температурі 1500 °C, досягнуто вражаючої комбінації високої межі текучості (2910 МПа) та твердості (9,06 ГПа). Механізми зміцнення включають тверде розчинення, дрібнозернисту структуру та зміцнення дислокацій. Важливо, що температура спікання є критичною для досягнення оптимальних механічних властивостей через взаємодію цих механізмів.

У дослідженні [6] розглядається майже евтектичний HEA $\text{Al}_{11.8}\text{CrCuFeNi}_{21}$, який був оброблений методом високого тиску (HIP) з досягненням майже повної щільності. Після обробки HIP в сплаві переважають однорідні та дрібні зерна B2, з вбудованою міжзерновою фазою, яка містить Cu та Cr. Частинки Fe_{0.3} і внутрішньозернові виділення Cu, Cu_3Ni та Fe–Cr відповідають за досягнення хорошої твердості (~470 HV) та чудової міцності на стиск (~1800 МПа). Деформація матриці B2 та часток Cr_{0.3} і Fe_{0.3} відбувалася головним чином через ковзання дислокацій. Водночас внутрішньозернові частинки Fe–Cr взаємодіяли з дислокаціями, створюючи складні взаємодії і заплутування. Виділення B2 Fe–Cr також деформувалися, утворюючи дефекти упаковки. Висока міцність сплаву пояснюється активацією численних механізмів деформації та зміцнення, а також значним зміцненням через ці процеси.

У статті авторів Shengxi Zhao, Asma Rezaei, Derek J. Fray та Ali Reza Kamali досліджено механотермохімічний синтез високоентропійного оксиду (HEO) та середньоентропійного оксиду (MEO) типу $(\text{FeCoNiCrMn})_3\text{O}_4$ та $(\text{FeCoNiCr})_3\text{O}_4$. Подрібнення в кульовому млині зменшує кристалічні розміри, що сприяє їх частковому розчиненню і допомагає утворенню HEO та MEO при термічній обробці. HEO-900 має високу накопичувальну ємність 1050,6 мАг/г при 100 мА/г, а MEO-900 показує вражаючу продуктивність при щільності струму 500 мА/г. Мікроструктура HEO-900 містить однофазні октаедричні кристали розміру 60–80 нм, тоді як MEO-900 має більший ступінь агломерації [7].

Прогалина в існуючих дослідженнях ВЕС полягає в недостатньому рівні оптимізації виробничих методів з точки зору енергетичної та економічної ефективності, а також у відсутності комплексного підходу до усунення технічних упущень, що виникають при виготовленні високоентропійних сплавів. Дослідження також не дають чітких результатів щодо масштабування методів виробництва на промисловому рівні, а також вимагають вдосконалення контролю мікроструктури та механічних властивостей для забезпечення стабільної якості матеріалів. Крім того, інтеграція останніх наукових досягнень у галузі матеріалознавства в концепцію виробництва ВЕС потребує додаткової уваги та оцінки потенціалу різних методів у контексті специфічних промислових потреб.

Головна частина. Високоентропійні сплави (ВЕС) можуть вироблятися різними методами, які поділяються на традиційні металургійні, порошкову металургію та нетрадиційні технології синтезу. До традиційних методів належить дугове або індукційне плавлення, при якому вихідні метали змішуються в плавильному тиглі та розплавляються при високих температурах (1500–3000°C), що забезпечує утворення однорідного розплаву. Подальше лиття та пластична деформація, зокрема прокатка, кування або екструзія, дозволяють покращити механічні властивості матеріалу. Для отримання високоентропійних покриттів або дрібнодисперсних матеріалів застосовують електронно-променеве або лазерне плавлення, що передбачає використання сконцентрованого джерела енергії для локального розплавлення металів [8].

Методи порошкової металургії включають механохімічне легування, гарячий ізостатичний пресинг та термохімічне пресування. Механохімічне легування передбачає інтенсивне подрібнення порошків у планетарних млинах, що сприяє утворенню твердих розчинів та рівномірному розподілу елементів у структурі матеріалу. Гарячий ізостатичний пресинг полягає у пресуванні порошкової суміші під високим тиском і температурою, що забезпечує отримання матеріалів із низькою пористістю та високою щільністю. Термохімічне пресування є поєднанням хімічних реакцій, зокрема самопоширюваного високотемпературного синтезу (SHS), із одночасним пресуванням, що дозволяє формувати композиційні ВЕС із заданими властивостями [9].

Нетрадиційні методи синтезу включають осадження з парової фази, лазерне сплавлення та електроімпульсне спікання. Осадження з парової фази (PVD, CVD) використовується для отримання високоентропійних покриттів, що демонструють високі механічні та термостійкі характеристики. Лазерне сплавлення (Selective Laser Melting, SLM) є технологією 3D-друку металевих деталей із ВЕС, що використовується в авіаційній, космічній та біомедичній галузях. Електроімпульсне спікання (Spark Plasma Sintering, SPS) застосовує імпульси електричного струму для нагрівання та спікання порошкових матеріалів, що дозволяє отримати ВЕС із дрібнозернистою структурою та високими механічними властивостями [10].

Основні методи синтезу високоентропійних сплавів, їх позитивні сторони та недоліки наведені в таблиці 1.

Високоентропійні сплави (ВЕС) можуть вироблятися різними методами, кожен з яких має свої технологічні особливості, переваги та обмеження. Традиційні методи, такі як дугове або індукційне плавлення, забезпечують високу однорідність сплаву завдяки рівномірному перемішуванню компонентів у розплаві. Це дозволяє здійснювати легування та регулювати хімічний склад сплаву, що є критично важливим для отримання необхідних властивостей. Однак висока енергозатратність цього методу, а також труднощі у контролі мікроструктури можуть призводити до утворення внутрішніх дефектів, таких як пори чи мікротріщини, що негативно впливають на експлуатаційні характеристики матеріалу.

Електронно-променеве та лазерне плавлення також належать до традиційних методів, проте вони надають можливість локального контролю структури матеріалу та формування покриттів з мінімальним вмістом шлаків. Це особливо важливо для створення високоякісних поверхонь та точного регулювання розподілу елементів. Однак ці методи потребують обладнання значної вартості, мають відносно низьку продуктивність і можуть бути непридатними для роботи з деякими хімічними елементами через їх специфічні фізико-хімічні властивості.

Таблиця 1 – Методи синтезу високоентропійних сплавів

Метод	Група методів	Позитивні сторони	Негативні сторони
Дугове або індукційне плавлення	Традиційні	Висока однорідність сплаву, можливість легування, простота реалізації	Висока енергозатратність, обмежений контроль мікроструктури, можливість утворення внутрішніх дефектів
Електронно-променеве або лазерне плавлення	Традиційні	Локальний контроль структури, можливість виготовлення покриттів, мінімальна кількість шлаків	Висока вартість обладнання, низька продуктивність, складність роботи з деякими елементами
Лиття з подальшою пластичною деформацією	Традиційні	Покращення механічних властивостей, рівномірний розподіл елементів, можливість зміни форми	Витрати на додаткову механічну обробку, складність контролю дрібнозернистої структури
Механохімічне легування (механічне сплавлення)	Методи порошкової металургії	Тонке диспергування компонентів, рівномірний розподіл елементів, можливість контролю розміру зерен	Висока тривалість процесу, необхідність подальшого спікання, механічний знос обладнання
Гарячий ізостатичний пресинг (HIP)	Методи порошкової металургії	Висока щільність, низька пористість, рівномірна мікроструктура	Високі енерговитрати, складність обладнання, висока вартість процесу
Термохімічне пресування	Методи порошкової металургії	Поєднання хімічних реакцій та спікання, можливість створення композиційних матеріалів	Складність контролю хімічних реакцій, необхідність точного підбору параметрів
Осадження з парової фази (PVD, CVD)	Нетрадиційні	Висока точність покриттів, рівномірна мікроструктура, низька кількість відходів	Низька швидкість процесу, висока вартість обладнання, обмежені товщини шарів
Лазерне сплавлення (SLM, 3D-друк металів)	Нетрадиційні	Висока точність, можливість виготовлення складних деталей, контроль структури на рівні мікроелементів	Високі витрати на матеріали та обладнання, обмеження в розмірах деталей, тривалість виробництва
Електроімпульсне спікання (SPS)	Нетрадиційні	Висока швидкість процесу, отримання дрібнозернистої структури, рівномірний розподіл фаз	Висока енергоємність, обмежена доступність технології, необхідність точного контролю електричних параметрів

Лиття з подальшою пластичною деформацією дозволяє покращити механічні властивості матеріалу за рахунок рівномірного розподілу елементів та контрольованої зміни форми виробу. Такий метод сприяє підвищенню міцності та пластичності сплаву. Водночас він вимагає додаткових витрат на механічну обробку та може ускладнювати контроль дрібнозернистої структури матеріалу, що впливає на його однорідність.

Методи порошкової металургії, такі як механохімічне легування та гарячий ізостатичний пресинг (HIP), дозволяють досягти високої щільності матеріалу та рівномірного розподілу елементів у мікроструктурі. Механохімічне легування забезпечує рівномірне диспергування компонентів і контроль розміру зерен, що позитивно впливає на механічні характеристики. Однак цей процес є тривалим, вимагає додаткового спікання для досягнення необхідної щільності та супроводжується механічним зносом обладнання. Гарячий ізостатичний пресинг, у свою чергу, сприяє мінімізації пористості та утворенню рівномірної мікроструктури, але є енерговитратним і потребує спеціалізованого обладнання, що підвищує собівартість виробництва.

Термохімічне пресування є ще одним методом порошкової металургії, який поєднує хімічні реакції та процес спікання, що дає змогу створювати композиційні матеріали з унікальними властивостями. Проте цей метод потребує точного контролю параметрів процесу, оскільки хімічні реакції можуть неконтрольовано впливати на кінцеві характеристики сплаву.

Нетрадиційні методи, такі як осадження з парової фази (PVD, CVD), лазерне сплавлення (SLM) та електроімпульсне спікання (SPS), відкривають нові можливості для створення ВЕС з високою точністю та контрольованою мікроструктурою. Осадження з парової фази забезпечує рівномірність покриття та мінімізує кількість відходів, проте має низьку швидкість осадження та високу вартість обладнання. Лазерне сплавлення дозволяє виготовляти складні деталі з точним контролем мікроструктури, але супроводжується високими витратами на матеріали, обладнання та значними обмеженнями за розмірами деталей. Електроімпульсне спікання відзначається швидким процесом та формуванням дрібнозернистої структури, що покращує механічні властивості матеріалу. Однак цей метод потребує точного контролю електричних параметрів та є енергоємним, що обмежує його масове використання.

Вибір методу виробництва ВЕС залежить від вимог до кінцевого матеріалу, доступних технологічних ресурсів та економічної доцільності. Традиційні методи підходять для масового виробництва завдяки відносній простоті реалізації, тоді як методи порошкової металургії та нетрадиційні технології дозволяють досягти більшої точності в контролі мікроструктури, що є важливим для високотехнологічних застосувань.

Розглянемо еталонні високоентропійні сплави. Сплав CoCrFeMnNi , відомий як сплав Кентора, утворюється методом дугового або індукційного плавлення. Процес включає завантаження вихідних металів у тигель, їх плавлення в індукційній або дуговій печі, подальше лиття у форми та термічну обробку для покращення механічних властивостей. Даний сплав характеризується високою пластичністю, корозійною стійкістю та рівномірною мікроструктурою, що робить його придатним для авіаційної промисловості (лопатки турбін), медицини (імпланти) та енергетики (деталі з високою корозійною стійкістю) [11]. Сплав TiZrNbHfTa виробляється за допомогою електронно-променевого або лазерного плавлення, що передбачає випаровування та осадження металів на підкладку у вакуумній камері. Це дозволяє отримати матеріал із високою жаростійкістю, стабільністю у вакуумі та хорошими механічними характеристиками. Даний сплав застосовується у космічній промисловості, ядерній енергетиці та біомедичних матеріалах [12]. ВЕС AlCoCrFeNi отримують за технологією лиття з подальшою пластичною деформацією, що передбачає плавлення компонентів, заливку в форму, прокатку або кування, а також термічну обробку. Такий підхід дозволяє покращити механічні властивості та забезпечити контроль мікроструктури, що робить матеріал придатним для автомобільної промисловості, авіації та теплостійких конструкцій [13].

Еталонні ВЕС, методи їх синтезу, етапи виробничого процесу, матеріали, обладнання та логістичні можливості наведені в таблиці 2.

Механохімічне легування використовується для створення сплаву CoCrFeNiAl , що відрізняється дрібнозернистою структурою та рівномірним розподілом елементів. Процес включає інтенсивне механічне змішування порошків, пресування та спікання. Готовий матеріал застосовується у зносостійких покриттях, електроніці та інструментальній промисловості [14]. Метод гарячого ізостатичного пресингу (HIP) дозволяє отримати ВЕС FeNiCrCoMo із високою щільністю та низькою пористістю. Основні етапи включають підготовку порошку, пресування під високим тиском і температурою, повільне охолодження та термічну обробку. Такий матеріал використовується в ядерній енергетиці, машинобудуванні та медичній галузі [15].

Термохімічне пресування застосовується для отримання ВЕС TiAlNbMo , що поєднує хімічні реакції та спікання. У процесі виробництва порошки змішуються, відбувається їх нагрівання з ініціацією хімічних реакцій, а потім здійснюється пресування та термообробка. Отримані матеріали використовуються для створення газотурбінних двигунів, авіаційних покриттів та теплозахисних екранів.

Таблиця 2 – Техніко-економічна характеристика еталонних високоентропійних сплавів

Приклад сплаву та характеристика	Метод	Етапи виробничого процесу	Еталонне обладнання	Необхідні матеріали та їх кількість	Можлива логістика продажу (галузі, продукти)
1	2	3	4	5	6
CoCrFeMnNi Висока пластичність, корозійна стійкість, однорідна мікроструктура	1. Дугове або індукційне плавлення	1. Завантаження металів у тигель. 2. Плавлення в дуговій або індукційній печі. 3. Рафінування та гомогенізація. 4. Лиття в форму. 5. Термічна обробка.	1. Індукційна плавильна піч Inductotherm VIP® Power-Trak. 2. Дугова плавильна піч ABB ArcSave®. 3. Ливарні форми з графіту або кераміки. 4. Термічна піч Nabertherm HT 04/16.	Co, Cr, Fe, Mn, Ni – по 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Авіація (лопатки турбін), медицина (імпланти), енергетика (корозійно-стійкі деталі).
TiZrNbHfTa Висока міцність, жаростійкість, стабільність у вакуумі	2. Електронно-променеве або лазерне плавлення	1. Підготовка порошку або пластин. 2. Випаровування та осадження металів на підкладку. 3. Контроль температури. 4. Повільне охолодження.	1. Електронно-променева установка Sciaky EBAM 110. 2. Лазерна плавильна система TRUMPF TruLaser Cell 8030. 3. Вакуумна камера Leybold HERAEUS. 4. Система контролю температури Optris CT Laser.	Ti, Zr, Nb, Hf, Ta – по 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Космічна промисловість, ядерна енергетика, біомедичні матеріали.
AlCoCrFeNi Покращені механічні властивості, можливість зміни форми, контрольоване зерно	3. Лиття з подальшою пластичною деформацією	1. Плавлення сплаву. 2. Лиття у форму. 3. Прокатка або кування. 4. Термообробка. 5. Контроль мікроструктури.	1. Ливарна піч OTTO JUNKER Induction Furnace. 2. Прокатний стан SMS group Quarto Mill. 3. Кувальний прес Schuler MH-1250. 4. Термічна піч Carbolite Gero HTF. 5. Мікроскоп для контролю мікроструктури Zeiss Axio Observer.	Al, Co, Cr, Fe, Ni – у співвідношенні 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Автомобільна промисловість, авіація, теплостійкі компоненти.
CoCrFeNiAl Дрібнозерниста структура, рівномірний розподіл елементів, покращена твердість	4. Механо-хімічне легування (механічне сплавлення)	1. Змішування порошків. 2. Інтенсивне механічне перемішування (сплавлення). 3. Спінання або пресування. 4. Термообробка.	1. Планетарний кульовий млин Retsch PM 400. 2. Гідравлічний прес Carver 3851. 3. Піч для спікання Linn High Therm VMK. 4. Термічна піч Nabertherm LHT 02/17 LB.	Co, Cr, Fe, Ni, Al – порошки по 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Зносостійкі покриття, електроніка, інструментальна промисловість.
FeNiCrCoMo Висока щільність, низька пористість, покращена корозійна стійкість	5. Гарячий ізостатичний пресинг (HIP)	1. Підготовка порошку. 2. Пресування під високим тиском і температурою. 3. Повільне охолодження. 4. Термообробка.	1. Установка HIP Quintus Technologies QIH 21. 2. Вакуумна камера Pfeiffer Vacuum. 3. Система контролю тиску Wika IPT-20. 4. Термічна піч Nabertherm LHT 04/17 LB.	Fe, Ni, Cr, Co, Mo – порошки у необхідних пропорціях (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Ядерна енергетика, машинобудування, медицина.
TiAlNbMo Поєднання хімічних реакцій та спікання, створення композитних структур	6. Термо-хімічне пресування	1. Змішування порошків. 2. Хімічні реакції в процесі нагріву. 3. Пресування під високим тиском. 4. Термообробка.	1. Пресувальна установка KOBELCO Hot Isostatic Press. 2. Термопіч Thermo Fisher Lindberg/Blue M. 3. Вакуумна система Edwards nXDS10i. 4. Система контролю температури Omega CN16DPT-305.	Ti, Al, Nb, Mo – порошки по 25% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Газотурбінні двигуни, авіаційні покриття, теплозахисні екрани

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6
TiN, AlTiN Висока твердість, зносостійкість, термостабільність	7. Осадження з парової фази (PVD, CVD)	1. Підготовка підкладки. 2. Випаровування цільового мате- ріалу. 3. Осадження парової фази на підкладку у вакуумній камері. 4. Формування тонкого покриття.	1. PVD-система компанії Oerlikon Balzers, модель INNOVENTA kila. 2. CVD-реактор від компанії Aixtron, модель AIX 2800G4. 3. Вакуумна система від Pfeiffer Vacuum, модель HiPace 700. 4. Система контролю товщини покриття від KLA-Tencor, модель P-7.	Титан (Ti), алюміній (Al) – кіль- кість залежить від бажаної товщини покриття та площі підкладки.	Інструмен- тальна промис- ловість (різальні інструменти), автомобільна промисло- вість (деталі двигунів), електроніка (захисні покриття).
AlCoCrFeNi Висока точність, можливість виготовлення складних геоме- трій, контроль мікроструктури	8. Лазерне сплавлення (SLM, 3D-друк металів)	1. Підготовка CAD-моделі деталі. 2. Розпилення порошку на робочу платформу. 3. Лазерне сплавлення порошку шар за шаром відпо- відно до моделі. 4. Охолодження та постобробка деталі.	1. Лазерна система SLM Solutions, модель SLM@280. 2. Система подачі порошку від компанії GTV Verschleißschutz, модель PF 2/2. 3. Програмне забезпечення для підготовки моделі від Materialise, модель Magics. 4. Система контролю процесу від Renishaw, модель InfiniAM Central.	Порошки Al, Co, Cr, Fe, Ni – у спів- відношенні 20% кожного; загальна маса залежить від розміру деталі.	Аерокосмічна промис- ловість (структурні компоненти), медицина (імплантати), енергетика (деталі турбін).

Метод осадження з парової фази (PVD, CVD) дає змогу отримати сплави TiN, AlTiN, що характеризуються високою твердістю, зносостійкістю та термостабільністю. Процес передбачає випаровування цільового матеріалу та осадження парової фази на підкладку у вакуумній камері. Такі покриття широко

застосовуються в інструментальній промисловості (для різального інструменту), автомобільній промисловості (деталі двигунів) та електроніці (захисні покриття) [16].

Нарешті, лазерне сплавлення (SLM, 3D-друк металів) дозволяє отримати складні за геометрією вироби зі сплав AlCoCrFeNi. Процес складається з підготовки CAD-моделі, пошарового розпилення порошку на платформу, лазерного сплавлення відповідно до заданої форми та подальшої постобробки. Такий підхід забезпечує високу точність та контроль мікроструктури, що робить матеріал придатним для аерокосмічної промисловості, медицини та енергетики [17].

Подальше вдосконалення технологій виготовлення високоентропійних сплавів (ВЕС) вимагає застосування багатофакторного підходу, орієнтованого на підвищення ефективності процесів, зменшення енерговитрат та покращення якості кінцевих продуктів. Одним із основних аспектів є зниження енергетичних витрат на етапі плавлення металів. Традиційні методи, такі як дугове та індукційне плавлення, характеризуються значними енерговитратами, що не тільки знижує економічну ефективність, а й має вплив на екологічну складову виробництва. Для цього важливо досліджувати альтернативні джерела енергії, зокрема сонячну та вітрову енергію, які можуть використовуватися для часткового забезпечення енергетичних потреб виробництва, що дозволить досягти сталого розвитку та зниження викидів.

Ще одним важливим напрямом є оптимізація мікроструктури високоентропійних сплавів. Складні фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час плавлення, можуть призводити до утворення дефектів у мікроструктурі, таких як пори та мікротріщини, що впливають на механічні властивості матеріалів. Інтеграція новітніх технологій, зокрема методів мікроскопії та безконтактних технологій візуалізації, дозволить на етапі виробництва здійснювати більш точний контроль за складом та структурою сплавів, що зменшить ймовірність утворення дефектів.

Для покращення якості матеріалів та підвищення їхніх експлуатаційних характеристик, актуальним є розвиток порошкової металургії. Використання методів гарячого ізостатичного пресування (HIP) та термохімічного пресування дозволяє досягти високої щільності та рівномірного розподілу елементів у матеріалі, що значно підвищує його механічні властивості. Однак, хоча ці методи демонструють високу ефективність, їх застосування супроводжується високими енерговитратами та значною вартістю обладнання. Тому розробка нових матеріалів для обладнання, що дозволяють знизити енергетичні витрати, та вдосконалення технологій пресування, сприятиме зниженню собівартості кінцевої продукції.

Ще однією перспективною технологією є 3D-друк металами, зокрема лазерне сплавлення (Selective Laser Melting – SLM), що дає можливість виготовляти складні деталі без використання традиційних форм. Ця технологія має великий потенціал, оскільки дозволяє зменшити витрати на матеріали та виготовлення інструментів, однак, вона вимагає високих витрат на обладнання та матеріали. Вдосконалення лазерних технологій, а також підвищення точності та швидкості процесу друку, дозволить підвищити ефективність виробництва та знизити вартість кінцевих виробів.

Слід також зробити акцент на механохімічному легуванні. Це інноваційна технологія, яка дозволяє отримувати матеріали з рівномірним розподілом компонентів і покращеними механічними властивостями. Проте цей процес зазвичай потребує тривалого часу та високих температур для спікання порошків, що збільшує енергетичні витрати. Покращення конструкції планетарних млинів та оптимізація параметрів процесу легування можуть призвести до зниження часу обробки та енергетичних витрат, що, в свою чергу, зробить цей метод більш економічно ефективним.

Урахування екологічних вимог та зменшення впливу виробничих процесів на навколишнє середовище є важливим аспектом у розробці нових технологій виготовлення ВЕС. Використання методів, які знижують кількість відходів і покращують переробку, є критичним для досягнення високої екологічної ефективності виробництва. Інноваційні методи осадження з парової фази та електроімпульсне спікання є перспективними у цьому контексті, оскільки вони дозволяють зменшити утворення шлаків і знизити викиди.

Автоматизація та цифровізація виробничих процесів відкривають нові можливості для моніторингу та контролю на всіх етапах виготовлення ВЕС. Використання систем штучного інтелекту та машинного навчання дозволить оптимізувати параметри виробництва, знижувати ймовірність помилок і покращувати якість продукції, що в кінцевому підсумку сприятиме зниженню витрат і підвищенню ефективності технологій виготовлення високоентропійних сплавів.

Розвиток технологій виготовлення ВЕС потребує інтеграції новітніх інженерних рішень, удосконалення існуючих технологічних процесів, а також активної роботи над зниженням енергетичних витрат і покращенням якості кінцевої продукції. Це дозволить досягти не тільки економічної ефективності, але й забезпечити сталий розвиток галузі, що відповідає екологічним вимогам сучасності.

Для всебічного розвитку наукових досліджень високоентропійних сплавів, впровадження їх у виробництво галузей промисловості п'ятого технологічного укладу є актуальним питанням сьогодення. Тому виникає нагальна потреба формування концепції виробництва високоентропійних сплавів.

Концепція виробництва високоентропійних сплавів (ВЕС) базується на використанні матеріалів, які складаються з п'яти і більше основних елементів у високих концентраціях, при цьому жоден з елементів не є домінуючим. Високоентропійні сплави володіють унікальними фізико-хімічними властивостями, що включають високу стійкість до корозії, зносостійкість, термостійкість, а також міцність, що робить їх перспективними для застосування в таких галузях, як аерокосмічна, енергетична, автомобільна промисловість та інших. Реалізація концепції виробництва таких матеріалів потребує інтеграції науково-технічних, економічних та правових аспектів, що забезпечують ефективність і конкурентоспроможність продукції.

Основними етапами концепції виробництва ВЕС є: розробка сплавів, вибір та комбінування елементів, що відповідають вимогам конкретної промисловості; розробка

технології виготовлення, що включає процеси плавлення, формування, злиття та подальшої обробки матеріалів для досягнення необхідних властивостей сплаву; тестування та контроль якості для перевірки надійності та ефективності матеріалів за допомогою лабораторних випробувань; а також впровадження технологій для масового виробництва після отримання дозволів на серійний випуск продукції.

Структурно-логічний підхід до реалізації концепції виробництва ВЕС передбачає комплексну організацію всіх етапів з урахуванням технічних, економічних та екологічних аспектів. Структурні елементи процесу включають: розробку технології та дизайну сплавів, що передбачає визначення необхідних фізико-хімічних властивостей матеріалів та оцінку економічної ефективності їх застосування в промисловості; підготовку виробничих потужностей, яка включає вибір обладнання для плавлення, лиття та подальшої обробки матеріалів, а також налаштування виробничих ліній для забезпечення стабільної якості продукції; тестування та стандартизацію, що полягає в проведенні серії тестів для визначення механічних, термальних і хімічних властивостей сплавів, а також розробці стандартів і сертифікації продукції для її відповідності міжнародним нормам; масштабування виробництва для впровадження масштабованих потужностей та розвитку технологій, що дозволяють знизити собівартість продукції.

Логіка впровадження процесів включає кілька фаз. Перша фаза – дослідження та проектування, що передбачає створення базових досліджень для вивчення властивостей ВЕС та аналіз їх потенціалу для застосування в різних галузях. Друга фаза – прототипування та тестування, що включає створення лабораторних зразків сплавів і проведення тестів на реальних умовах експлуатації. Третя фаза – виробниче впровадження та масштабування, що полягає у визначенні найбільш економічно вигідних способів виробництва та масштабуванні до промислового рівня, а також у розробці плану постачання та реалізації продукції.

Економічно-правовий аспект реалізації концепції виробництва високоентропійних сплавів є ключовим для забезпечення ефективного розвитку виробництва. Економічний аспект включає оцінку вартості виробництва з урахуванням вартості сировини, енергетичних витрат, виробничих потужностей та робочої сили. Важливим також є залучення фінансування, яке може здійснюватися через державні гранти, кредити або інвестиційні програми. Крім того, створення маркетингової стратегії просування ВЕС на ринку та оцінка конкурентних переваг є важливими складовими успішної реалізації продукції.

Правовий аспект включає захист інтелектуальної власності, що передбачає реєстрацію патентів на нові матеріали та технології виготовлення ВЕС, а також дотримання екологічних стандартів, що регулюють викиди, утилізацію відходів та охорону навколишнього середовища в процесі виробництва. Сертифікація продукції є необхідною для підтвердження її відповідності міжнародним стандартам. Крім того, юридичне оформлення інвестиційних проектів і партнерств сприяє розвитку співпраці з державними та приватними підприємствами, що забезпечує економічну ефективність виробництва.

Загалом, концепція виробництва високоентропійних сплавів передбачає інтеграцію інноваційних технологій, ефективне управління виробничими процесами та врахування економічних і правових аспектів. Реалізація цієї концепції забезпечить розвиток нових матеріалів, що відповідають вимогам сучасної промисловості, підвищить технічні характеристики продукції та сприятиме економічному зростанню в галузі.

Реалізація концепції виробництва високоентропійних сплавів на рівні держави та металургійних підприємств складається з кількох ключових етапів, що охоплюють різні аспекти технологічного, економічного та правового характеру.

На рівні держави першим етапом є розробка національної стратегії розвитку нових матеріалів, що включає аналіз поточного стану металургійної та матеріалознавчої промисловості. Визначення потреб у нових матеріалах та можливостей для інтеграції високоентропійних сплавів у стратегічні галузі, зокрема енергетику, аерокосмічну промисловість та автомобільну промисловість, є необхідним для формування пріоритетних напрямів розвитку. Далі важливою складовою є підтримка інновацій та науково-дослідних розробок через фінансування досліджень у галузі матеріалознавства, створення науково-інноваційних центрів, що об'єднують наукові установи та виробничі підприємства для спільної роботи над новими технологіями. Водночас держава

повинна розробити нормативно-правову базу, що включає стандарти для виробництва та застосування високоентропійних сплавів, а також забезпечити механізми сертифікації та контролю за їх якістю. Важливим кроком є підтримка екологічних ініціатив щодо виробництва цих матеріалів, що дозволить знизити їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Держава також повинна створити сприятливий інвестиційний клімат, пропонуючи податкові пільги для підприємств, що інвестують у розвиток технологій виробництва високоентропійних сплавів, та сприяти залученню міжнародних інвестицій через угоди та партнерства. Підготовка кадрів також є ключовим елементом, що включає створення навчальних програм у вищих навчальних закладах, а також перепідготовку робітників для металургійних підприємств.

На рівні металургійних підприємств важливо розпочати з оцінки технічних можливостей для впровадження нових технологій виробництва високоентропійних сплавів. Підприємства повинні визначити готовність своїх виробничих потужностей до адаптації нових процесів та вибору відповідного технологічного обладнання. Наступним етапом є розробка та оптимізація технології виробництва, що включає випробування лабораторних партій сплавів і вдосконалення процесів для забезпечення стабільної якості продукції. У цьому контексті важливими є інвестиції в науково-дослідницьку діяльність і модернізацію виробничих ліній для підвищення ефективності та зниження витрат.

Окремо слід зазначити важливість сертифікації продукції за міжнародними стандартами, що дозволяє забезпечити високу якість сплавів та підтвердити їх відповідність вимогам ринку. Крім того, створення системи контролю якості на всіх етапах виробництва дозволить стабільно постачати продукцію вітчизняним та міжнародним замовникам. Маркетинг і стратегічне планування є наступними важливими етапами, що включають оцінку ринків збуту для високоентропійних сплавів, розробку стратегій для входу на ці ринки та встановлення партнерських відносин з іншими підприємствами, що використовують ці матеріали.

Моніторинг змін у технологіях та вимогах ринку дозволить підприємствам адаптувати виробництво до нових умов, а інновації та розширення виробничих потужностей дадуть можливість задовольнити зростаючий попит. Таким чином, реалізація концепції виробництва високоентропійних сплавів потребує комплексного підходу, включаючи інвестиції, наукові дослідження, модернізацію виробництва та забезпечення конкурентоспроможності продукції на міжнародних ринках.

Висновки. У статті розглянуто концептуальні основи високоентропійних сплавів (ВЕС) та методи їх виробництва, що є ключовими для подальшого розвитку матеріалознавства. Проведений аналіз існуючих технологій показав, що традиційні металургійні підходи, такі як дугове та індукційне плавлення, забезпечують високу однорідність сплаву, але мають обмежену точність контролю мікроструктури. Методи порошкової металургії дозволяють отримувати ВЕС із рівномірним розподілом елементів, однак їх використання супроводжується високими енергетичними витратами. Нетрадиційні технології, такі як лазерне плавлення та осадження з парової фази, відкривають нові можливості щодо контролю структури матеріалу, проте їх широкомасштабне впровадження стримується вартістю обладнання та обмеженою продуктивністю.

Визначено основні технічні прогалини у виробництві ВЕС, зокрема труднощі у контролі мікроструктури, нерівномірність розподілу елементів та енергетичні витрати. Для їх усунення запропоновано комбіновані методи, що інтегрують традиційні та сучасні технології, а також передбачають використання чисельного моделювання для оптимізації процесів. Запропоновано вдосконалені методи проектування сплавів, які базуються на аналізі фізико-хімічних властивостей компонентів та враховують умови експлуатації матеріалів.

Проаналізовано технології контролю мікроструктури та механічних властивостей ВЕС. Використання методів лазерного плавлення, електроімпульсного спікання та осадження з парової фази дозволяє суттєво підвищити точність регулювання параметрів сплавів та зменшити кількість дефектів. Водночас розробка нових підходів до контролю фазових перетворень у процесі виробництва сприятиме отриманню матеріалів із передбачуваними характеристиками.

Оцінено перспективи масштабування виробництва ВЕС. Незважаючи на високий потенціал новітніх методів, їх впровадження у промислові умови вимагає подальших досліджень щодо підвищення продуктивності та зниження витрат. Запропоновано стратегічні напрямки для розширення застосування ВЕС у промисловості, зокрема в авіаційній, енергетичній та медичній галузях.

Вперше проведено інтеграцію науково-технічних аспектів у концепцію виробництва ВЕС, що включає прототипування, тестування та адаптацію технологічних процесів під специфічні промислові потреби. Здійснено комплексну оцінку потенціалу різних методів виробництва у контексті їх економічної ефективності та технічної доцільності.

Таким чином, проведене дослідження вдосконалює розуміння процесів виробництва ВЕС, що сприятиме їх ефективнішому використанню у високотехнологічних галузях промисловості.

References

1. Solidification and tribological behavior of CoCrFeMnNi high entropy alloy fabricated by laser powder bed melting / S. Liu et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. P. 179137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179137>
2. Refractory high-entropy alloys fabricated using laser technologies: A concrete review / W. Cheng et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.037>
3. Electron beam melting of (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ high-entropy alloy / C. Peng et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. P. 170752. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170752>
4. On the mechanism of plastic deformation in metastable TiZrHfNb refractory high entropy alloys during tensile and sliding friction at 500 °C / Y. Cao et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. P. 147618. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147618>
5. Huang L., Chen S., Pan Y. Dual-phase WNbTaV refractory high-entropy alloy with exceptional strength and hardness fabricated via spark plasma sintering. *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 43. P. 111805. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111805>
6. Pan X., Wang X., Qiu C. Microstructural development and mechanical behavior of a near-eutectic high entropy alloy Al_{1.8}CrCuFeNi₂ fabricated by hot isostatic pressing. *Intermetallics*. 2024. Vol. 171. P. 108361. URL: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108361>
7. Mechano-thermochemical preparation of nanostructured (FeCoNiCr/Mn)₃O₄ high and medium entropy oxides: Structural, microstructural, magnetic and Li-ion storage characterization / S. Zhao et al. *Chemical Engineering Journal*. 2024. P. 156230. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156230>
8. Arun S., Radhika N., Saleh B. Advances in vacuum arc melting for high entropy alloys: A review. *Vacuum*. 2024. Vol. 226. P. 113314. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113314>
9. Microstructure and mechanical properties of NbMoTaW porous refractory high entropy alloy processed by powder metallurgy / B. Zhang et al. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2025. Vol. 128. P. 107063. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107063>
10. Influence of heat treatment on the microstructural evolution of CoCrFeNi high-entropy alloy prepared by Selective Laser Melting / C. Yang et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.02.101>
11. Enhanced corrosion resistance and gas pore- induced pitting mechanisms of CoCrFeMnNi high entropy alloy fabricated by underwater directed metal deposition with feedstock modification / M. Chen et al. *Corrosion Science*. 2025. Vol. 245. P. 112716. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112716>
12. Persistent slip observed in TiZrNbHfTa: A body-centered high-entropy cubic alloy / M. Tanaka et al. *Scripta Materialia*. 2021. Vol. 200. P. 113895. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.113895>
13. Effect of manufacturing route on microstructure and micromechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy / A. Kurdi et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. P. 177477. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177477>
14. Mechanical alloying synthesis and spark plasma sintering consolidation of CoCrFeNiAl high-entropy alloy / W. Ji et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 589. P. 61–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.146>
15. Multiscale plastic deformation in additively manufactured FeCoCrNiMo high-entropy alloys to achieve strength–ductility synergy at elevated temperatures / D. Lin et al. *International Journal of Plasticity*. 2024. P. 104142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104142>
16. Strategy for achieving high-performance PVD nano-multilayered AlTiN/TiN coated milling tool: Fine platelet-grained WC–Co substrate and interface regulation / Z.-q. Zhong et al. *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 435. P. 128265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128265>

17. Moradi-Ganjeh M., Farzadi A., Ramazani A. Atomic scale melting/solidification behavior and structural evolutions of AlCoCrFeNi high-entropy alloy in selective laser melting process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 27. P. 6811–6821. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.149>

Belokon Yurii, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-9327-5219

Shapurov Olexandr, professor, doctor of economics sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4381-4886

Hrechanyi Oleksii, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-0524-4998

Protsenko Viktor, senior researcher, candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-5148-0361

TECHNOLOGIES FOR THE SYNTHESIS OF HIGH-ENTROPY ALLOYS: CURRENT STATE AND FUTURE DIRECTIONS

The article explores the conceptual foundations of high-entropy alloys (HEAs) and various technologies for their production. The analysis of traditional metallurgical methods, such as arc and induction melting, highlights their effectiveness in ensuring material homogeneity while emphasizing their limited capabilities in precise microstructure control. Powder metallurgy provides a uniform element distribution but is characterized by high energy consumption. Alternative methods, including laser melting and vapor phase deposition, offer new prospects for controlling alloy structures; however, their scalability is hindered by equipment costs and low productivity.

Key technical challenges impeding the advancement of HEA production have been identified, including difficulties in microstructure control, uneven component distribution, and significant energy consumption. To address these challenges, a combination of traditional and modern methods is proposed, along with the use of numerical modeling to optimize production processes. Advanced alloy design approaches are based on the physicochemical analysis of components and take into account operational conditions.

Modern methods for controlling the microstructure and mechanical properties of HEAs are reviewed. The application of laser melting, electro-pulse sintering, and vapor phase deposition technologies enables more precise regulation of material parameters and defect reduction. Additionally, the importance of developing new approaches to phase transformation control is emphasized, as this will facilitate the predictable formation of alloy structures.

The prospects for scaling up HEA production are examined, highlighting the need for further research to enhance productivity and reduce costs. Strategic directions for integrating HEAs into industrial sectors, including aerospace, energy, and medicine, are proposed.

A comprehensive approach to HEA production is suggested, incorporating prototyping, testing, and the adaptation of technological processes to meet industrial requirements. The potential of various production methods is assessed in terms of their economic efficiency and technical feasibility.

Thus, this study enhances the understanding of HEA manufacturing processes, contributing to their broader application in high-tech industries.

Keywords: high-entropy alloys, synthesis, powder metallurgy, laser fusion, 3D printing, mechanical characteristics.