

Лук'янова Катерина Сергіївна, Магістрант кафедри ливарного виробництва. Тел: 0660516104, E-mail: boldyrevaekaterina020@gmail.com
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

СУЧАСНІ НАПРЯМИ ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРОБОК ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА

Анотація. У статті доведено, що важливими здобутками теоретичних розробок щодо використання сплавів на основі заліза є наукові праці вітчизняних дослідників. Так, у дисертаційному дослідженні Карпець М.В. вперше систематично досліджено фазовий склад, мікроструктуру та фізико-механічні властивості сплавів системи Cr-Ni-Co-Fe-Cu-Al в концентраційному інтервалі (0-3 моль) вмісту хімічних елементів. Встановлено, що в дослідженій системі внаслідок високої ентропії змішування утворюються лише прості тверді розчини заміщення на основі ГЦК та ОЦК структур, які характеризуються високим комплексом фізико-механічних властивостей, не притаманних жодному із складових компонентів. Обґрунтовано, що основним фактором фазоутворення у високоентропійних сплавах є величина середньої електронної концентрації сплаву. Інтервал значень середньої електронної концентрації, в якому існують ОЦК чи ГЦК структури, залежить від швидкості кристалізації розплаву та наявності в сплаві елементів, схильних до ліквідації. Встановлено елементи-стабілізатори твердих розчинів на основі фаз з ОЦК (Al, Cr) та ГЦК (Cu, Ni, Co) структурами. Суттєвим науковим досягненням слід вважати вперше розроблений високоентропійний сплав CrMnFeCoNi₂Cu на основі твердого розчину зі структурою ГЦК фази, здатний деформуватись прокаткою при кімнатній температурі на 98 % без появи тріщин або надривів. Досліджено його фазовий склад, мікроструктуру та фізико-механічні властивості на усіх етапах деформування. Показано, що в Україні вперше при холодній прокатці у високоентропійному сплаві CrMnFeCoNi₂Cu, подібно до чистих металів та сплавів з ГЦК-структурою, виникає текстура прокатки з основною компонентою. В статті наведено приклади інших теоретичних розробок щодо використання сплавів на основі заліза.

Ключові слова: сплави, залізо, властивості, кристалізація, концентрація, мікроструктура, фізико-механічні властивості.

Lukianova Kateryna Serhiivna, Master's student of the Department of Foundry Production, Phone: 0660516104, E-mail: boldyrevaekaterina020@gmail.com
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", str. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

CURRENT DIRECTIONS OF THEORETICAL DEVELOPMENTS REGARDING THE USE OF IRON-BASED ALLOYS

Abstract. The article proves that important achievements of theoretical developments regarding the use of iron-based alloys are the scientific works of domestic researchers. Thus, in the dissertation research of Karpets M.V. for the first time, the phase composition, microstructure and physico-mechanical properties of alloys of the Cr-Ni-Co-Fe-Cu-Al system in the concentration range (0-3 mol) of the content of chemical elements were systematically investigated. It was established that in the studied system, due to the high entropy of mixing, only simple solid substitution solutions based on fcc and bcc structures are formed, which are characterized by a high complex of physical and mechanical properties that are not inherent to any of the constituent components. It is substantiated that the main factor of phase formation in high-entropy alloys is the value of the average electron concentration of the alloy. The interval of values of the average electron concentration, in which bcc or fcc structures exist, depends on the rate of crystallization of the melt and the presence of elements prone to liquation in the alloy. Stabilizing elements of solid solutions based on phases with bcc (Al, Cr) and fcc (Cu, Ni, Co) structures were established. A significant scientific achievement should be considered the first developed high-entropy CrMnFeCoNi₂Cu alloy based on a solid solution with an fcc phase structure, capable of being deformed by rolling at room temperature by 98% without the appearance of cracks or tears. Its phase composition, microstructure, and physical and mechanical properties at all stages of deformation were studied. It is shown that, for the first time in Ukraine, during cold rolling in the high-entropy CrMnFeCoNi₂Cu alloy, similar to pure metals and alloys with an fcc structure, a rolling texture with the main component appears. The article provides examples of other theoretical developments regarding the use of iron-based alloys.

Keywords: alloys, iron, ductility, crystallization, concentration, microstructure, physical and mechanical properties.

Лукьянова Екатерина Сергеевна, Магистрант кафедры литейного производства, Тел: 0660516104, E-mail: boldyryevaekaterina020@gmail.com

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Курпичева, 2, Харьков, Украина, 61002.

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Аннотация. В статье доказано, что важными достижениями теоретических разработок использования сплавов на основе железа являются научные труды отечественных исследователей. Так, в диссертационном исследовании Карпец М.В. впервые систематически исследованы фазовый состав, микроструктура и физико-механические свойства сплавов системы Cr-Ni-Co-Fe-Cu-Al в концентрационном интервале (0-3 моль) содержания химических элементов. Установлено, что в исследованной системе в результате высокой энтропии смешения образуются только простые твердые растворы замещения на основе ГЦК и ОЦК структур, которые характеризуются высоким комплексом физико-механических свойств, не присущих ни одному из составляющих компонентов. Обосновано, что основным фактором фазообразования высокоэнтропийных сплавов является величина средней электронной концентрации сплава. Интервал значений средней электронной концентрации, где существуют ОЦК или ГЦК структуры, зависит от скорости кристаллизации расплава и наличия в сплаве элементов, склонных к ликвации. Установлены элементы стабилизаторы твердых растворов на основе фаз с ОЦК (Al, Cr) и ГЦК (Cu, Ni, Co) структурами. Существенным научным достижением следует считать впервые разработанный высокоэнтропийный сплав CrMnFeCoNi₂Cu на основе твердого раствора со структурой ГЦК фазы, способный деформироваться прокаткой при комнатной температуре на 98% без появления трещин или надрывов. Исследованы его фазовый состав, микроструктура и физико-механические свойства на всех этапах деформирования. Показано, что в Украине впервые при холодной прокатке высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi₂Cu, подобно чистым металлам и сплавам с ГЦК-структурой, возникает текстура прокатки с основной компонентой. В статье приведены примеры других теоретических разработок использования сплавов на основе железа.

Ключевые слова: сплавы, железо, свойства, кристаллизация, концентрация, микроструктура, физико-механические свойства.

Актуальність теми. Традиційний підхід до розробки металевих сплавів полягає у виборі матеріалу основи залежно від головних вимог, які пред'являють замовники до майбутнього виробу і легувальних елементів для надання необхідних технологічних і експлуатаційних властивостей. Це обумовило створення великої кількості багатоконпонентних сплавів на основі заліза - сталі, мідні, алюмінієві, титанові та нікелові сплави. В окремих випадках в основі сплаву можуть бути два або три компоненти, наприклад латуні на основі системи Cu-Zn, чи тинідур на основі Fe-NiCr. Даний спосіб розробки матеріалів призводить до накопичення великого обсягу знань про сплави на основі одного елемента. Теорії щодо фазоутворення та формування властивостей також обмежуються сплавами на основі одного чи двох елементів. Такий дисбаланс стає більш яскраво вираженим зі збільшенням кількості компонентів, що входять до сплаву. Для п'ятикомпонентних систем і систем вищого порядку інформація про сплави, які знаходяться в центрі діаграми стану, нині відсутня. Все це призводить до зменшення кількості сплавів, які можуть використовуватися для отримання матеріалів та покриттів різного призначення. Такий стан обумовив потребу у систематизації теоретичних розробок щодо створення матеріалів різного призначення на основі багатоконпонентних систем.

Викладення основного матеріалу. Взаємодія різних металів один з одним у твердому стані практично не відбувається. Метали в рідкому стані здебільшого змішуються у будь-яких співвідношеннях і утворюють однорідні системи – сплави. Сплавом називається речовина, яка складається з двох або більше елементів, із яких принаймні один є металом. Властивості сплавів значно відрізняються від компонентів, які входять до їхнього складу. Наприклад, міцність на розрив латуні (сплав міді і цинку) втричі вища, ніж у міді, і в шість разів – порівняно з цинком. За властивостями сплави поділяють на жароміцні, жаростійкі, антифрикційні, зносостійкі, корозійностійкі, легкі, а також на такі, які мають особливі характеристики (теплові, електричні, магнітні та інші). Для одержання сплавів розроблено дуже багато способів. Часто використовують кристалізацію при охолодженні розплавлених компонентів, спільне електроосадження твердих часток з рідкої або газоподібної фази, дифузійне насичення одного компонента іншим. Властивості сплавів суттєво залежать від особливостей їх структури і характеристик компонентів, хімічної взаємодії між ними та розчинності.

Сплави заліза – це сплави двох і більше металів, вміст заліза в яких перевищує сумарний вміст інших металів. Відрізняються від сталей і чавунів тим, що у їх складі практично відсутні домішки проникнення, наприклад, вуглецю та азоту. Сплави заліза почали застосовувати у 19 ст. здебільшого як матеріали функціонального призначення, тобто такі, у яких одна з їх фізико-хімічних властивостей має визначальне значення (магнітні, електротехнічні, корозійні та інші характеристики). У промисловості основним матеріалом, широко застосовуваним у машинобудуванні, а також для виготовлення різного інструменту є сталь. Сталь - це сплав заліза з вуглецем і домішками (кремній, марганець, ванадій, ніобій, тощо), в якому вуглецю не більше, ніж 2,14 %. Сталь — це міцний сплав. Завдяки різноманітним системам легування сталі можна діставати абсолютно різний комплекс властивостей нових сплавів. Вона порівняно недорога, володіє комплексом цінних механічних, фізико-хімічних та технологічних властивостей, виробляється в великих кількостях. Якість сталей визначається вмістом шкідливих домішок (сірки, фосфору, неметалевих твердих включень, газів). Чим чистіше сталь, тим вище її якість. Для очищення сталі використовуються такі методи: обробка синтетичним шлаком, вакуумна дегазація, електрошлаковий переплав, вакуумно-дугового переплав, плавка в електронно-променевих печах, плавка в плазмодугових печах [1].

Окремі типові сплави на основі заліза інколи називають сталями, незважаючи на незначний вміст вуглецю в їх складі (мартенситостаріючі сталі, нержавіючі сталі аустеніт. класу, які є сплавами з хромом і нікелем, сталі, що термозміцнюються шляхом неповного зворотного перетворення, та інші сплави з нікелем). Це пояснюється тим, що вони можуть змінювати під час термооброблення свої механічні характеристики та використовуватися як конструкційні матеріали, тоді як більшість функціональних сплавів

переважно вирізняються однорідним фазовим і хімічним складом, а їх термооброблення відбувається лише для покращення функціональних властивостей металу.

Перша якість, з якою в нас асоціюється метал, це міцність. Міцність визначається декількома властивостями, з огляду на які саме сталь та її сплави відносять до найміцніших металів. Міцність-здатність матеріалу витримувати зовнішні навантаження та не руйнуватися. Коли оцінюють міцність металу, враховують багато параметрів та якостей: наскільки добре метал чинить опір розриву, як він протидіє звуженню, який поріг переходу від пружного до пластичного стану, коли деформація матеріалу стає безповоротною, який опір поширенню тріщин має матеріал тощо. Міцні сплави та природні метали отримують завдяки комбінуванню різних металів. Потреба у різноманітних якісних характеристиках металів, серед яких і міцність, призвела до появи різних сплавів. Одним із важливих у цьому сенсі сплавів є сталь — комбінація заліза та вуглецю.

Оскільки визначення міцності металу потребує врахування багатьох чинників, важко однозначним чином впорядкувати метали від «найміцнішого» до «найслабшого». Розподіл металів за міцністю буде залежати від того, яка властивість найбільш важлива в кожному конкретному випадку. Надамо характеристику сталі та її сплавам.

До високовуглецевої сталі відносять сплав заліза з високим вмістом вуглецю. Така сталь виходить міцною, порівняно дешевою, довговічною та добре піддається обробці. З недоліків варто зазначити низьку прогартовуваність та низьку теплостійкість, що робить вуглецеву сталь уразливою в агресивному середовищі.

Сфера застосування вуглецевої сталі - виготовлення різних інструментів, деталей машин та складних механізмів, елементи металоконструкцій. Важливою умовою застосування таких виробів є неагресивне середовище.

Сплав сталі, заліза та нікелю — один із найміцніших сплавів. Є декілька його різновидів, але загалом легування вуглецевої сталі нікелем збільшує межу плинності до 1420 МПа, водночас показник межі міцності на розрив доходить до 1460 МПа. Сплави на нікелевій основі використовують у конструкціях деяких типів потужних атомних реакторів у якості високотемпературних оболонок для захисту уранових стрижнів від корозії.

Нержавіюча сталь — корозієстійкий сплав сталі, хрому та марганцю з межею плинності до 1560 МПа та межею міцності на розрив до 1600 МПа. Як і всі різновиди сталі, цей сплав має високу ударостійкість та середній бал за шкалою Мооса. Завдяки її антикорозійним властивостям нержавіючу сталь широко застосовують у різноманітних галузях — нафтохімічній промисловості, машинобудуванні, будівництві, електроенергетиці, харчовій промисловості та виготовленні побутових приладів, суднобудуванні.

Особливо тверді сплави на основі карбідів вольфраму, титану, танталу можна визнати як найміцніші. Титан — це найбільш розтиражований у засобах масової інформації та кінематографі природний метал, який прийнято асоціювати із суперміцністю. Його питома міцність майже вдвічі вища за аналогічну характеристику легованих сталей. Він має найвище відношення міцності на розрив до щільності з усіх металів. За цим показником він обійшов вольфрам. Титан йому поступається тільки за шкалою твердості Мооса. Титанові сплави міцні та легкі. Титан та його сплави часто використовуються в аерокосмічній промисловості. З нього роблять елементи обшивки космічних кораблів, паливні баки, деталі реактивних двигунів. Активно використовують титан й у морському суднобудуванні, будівництві трубопроводів для агресивних середовищ та в якості конструкційного матеріалу.

Вольфрам із його найвищою серед усіх природних металів міцністю на подовження нерідко комбінують зі сталлю та іншими металами для створення ще міцніших сплавів. До недоліків вольфраму можна віднести його крихкість та здатність до руйнування в разі удару. Вольфрам застосовують у металургії для виробництва легованих сталей та різних сплавів, в електротехнічній індустрії для виготовлення елементів освітлювальних приладів, у машино- та авіабудуванні, у космічній галузі та хімічній промисловості. Сплав вольфраму та вуглецю (карбід вольфраму) використовують для виробництва інструментів із різальними краями, зокрема ножів та дискових пилок, а також зносостійких робочих елементів гірничошахтного устаткування та прокатних валків.

Тантал має відразу три переваги — міцність, щільність та стійкість до корозії. Він належить до групи тугоплавких металів, як і вольфрам.

Тантал використовують у виробництві електроніки та надпотужних конденсаторів для персональних комп'ютерів, смартфонів, камер та електронних пристроїв в автомобілях.

Є низка інноваційних сплавів, які з'явилися зовсім нещодавно, проте вже встигли дістати визнання завдяки своїм надзвичайним властивостям та активно використовуються в аерокосмічній сфері та медицині.



Алюмінід титану — сплав титану та алюмінію, який витримує високі температури та має антикорозійні властивості, але водночас досить крихкий та недостатньо пластичний. Проте, він знайшов своє застосування у виробництві спеціальних захисних покриттів.

Сплав титану із золотом — ще один унікальний матеріал, який було розроблено декілька років тому групою вчених з університетів США. Основне завдання, що вирішували вчені, полягало у створенні матеріалу, міцнішого за титан, який можна було б застосовувати в медичній галузі для виробництва протезів, сумісних із біотканиною. Справа в тому, що титанові протези, незважаючи на їхню міцність, зношуються порівняно швидко та потребують заміни кожні 10 років. А ось сплав титану із золотом виявився вчетверо міцнішим за ті сплави, що зараз використовуються у виробництві протезів [2].

Створення та широке застосування функціональних сплавів заліза у якості магнітнотвердих, магнітнотвердих матеріалів, а також магнітнострикційних, термомагнітних сплавів, матеріалів для запису інформації обумовлене розвитком електро- та радіотехніки. Магнітнотверді сплави на основі заліза, до яких відносять і чисте залізо, сплави з нікелем та ін. металами, використовують як високопроникні матеріали (пермалой, супермендюр та ін.) під час генерування електрики, в електродвигунах, електротрансформаторах, які працюють при мін. показниках коерцитивної сили для зменшення втрат на вихрові струми, низькій магнітнострикції. Магнітнотверді сплави заліза слугують для виготовлення постійних магнітів (низька магнітна проникність, висока коерцитивна сила, великі гістерезисні втрати). Їх створюють шляхом легування заліза хромом, вольфрамом, кобальтом, алюмінієм, нікелем, титаном, міддю з подальшим термообробленням. Вироби зі складнолегованих магнітнотвердих сплавів заліза отримують здебільшого литтям, оскільки формозмінення їх засобами мех. оброблення ускладнене високими твердістю та крихкістю. Сплави заліза використовують для виготовлення магнітних матеріалів спеціального призначення (магнітнострикційні і термомагнітні матеріали, матеріали з прямою петлею гістерезису для техніки надвисоких частот).

Теоретичні основи для створення магнітних сплавів заліза та ін. магнітних матеріалів в Україні закладено дослідженням усього світу визнаних наукових шкіл акад. НАНУ О. Ахієзера та В. Бар'яхтара. Вони спільно з ученими С. Вонсовський, К. Белов та інші обумовили сучасний рівень у галузі теорії та практичного використання явища магнетизму. Широке застосування отримали залізні сплави також у технологіях створення функціональних матеріалів методом порошкової металургії, зокрема залізомісних спечених порошкових матеріалів з заданим розподілом міді чи інших вкраплень необхідного розміру з малорозчинних часток у залізі. Методом порошкової металургії можливе створення заданої

макроструктурної неоднорідності хімічного складу у виробках чи напівфабрикатах під час конструювання залізних сплавів з градієнтними властивостями по перерізу виробів, що суттєво впливає на їх службові характеристики. Обсяг промислового виготовлення виробів широкого призначення зі залізних сплавів методом порошкової металургії складає понад 80 % від загального виробництва. Вагомий внесок у розвиток цього напрямку зробили акад. НАНУ А. Косторнов, В. Скороход, І. Федорченко та інші дослідники [3].

Певний вклад у дослідження властивостей сталі внесли закордонні дослідники. Нгуьогіу Нукуфорчун [4] та інші робили оцінку експлуатаційної деградації трубопровідної сталі. Як механічні, так і електрохімічні властивості сталі погіршуються після експлуатації, як і їх стійкість до розтріскування, викликаного навколишнім середовищем. Найбільш інтенсивно знижуються характеристики опору крихкому руйнуванню та корозійного розтріскування під напругою, що пов'язано з розвитком об'ємних розсіяних мікропошкоджень матеріалу. Найбільш чутливими показниками зміни стану матеріалу внаслідок деградації є ударна в'язкість і в'язкість руйнування за методом J-інтеграла. Звернуто увагу на наводнювання стінки труби зсередини в результаті електрохімічної взаємодії металу труби з конденсованою вологою, що сприяє експлуатаційній деградації сталі внаслідок спільної дії робочих напружень і водню. Розвиток мікропошкоджень уздовж текстури сталі було підтверджено металографічно як тенденція до вибіркового травлення меж між суміжними смугами фериту та перліту та фрактографічно шляхом виявлення елементів крихкого руйнування на поверхнях зламу, а саме розшарування та сколу, що вказує на місця ослаблення когезії між феритові та перлітні смуги.

Niwa Mohammad Qadr1, Ari Maghdid Hamad [5] розглядали механічні властивості феритних мартенситових сталей для ядерних програм. Залежно від умов експлуатації, використання високотемпературних феритних та мартенситних матеріалів, такі як сталь P91 і P92, віддають перевагу в деяких конструкціях для використання з позаядерної та внутрішньоядерної програми. Більш сучасні, феритні та мартенситні сталі (вміст хрому 9-12% Cr) тепер використовуються в Generation. Однак у деяких частинах реактора, які працюють на нижчі температури (трубопроводи, посудини під тиском, тощо) використовуються низьколеговані сталі. Було помічено, що сталь з меншим вмістом хрому, ніж 9-12%, ймовірно, може бути використана в цих програмах, заперечення використання сталей, таких як A533B.

R. Aparicio-Fernández H. Springer [6] систематично вивчають морфологію, розмір і дисперсію частинок TiB₂, утворених на місці з розплавів на основі Fe-Ti-B, а також їхній хімічний склад, кристалічну структуру та механічні властивості. Вплив додавання 5 мас.% Cr, Ni, Co, Mo, W, Mn, Al, Si, V, Ta, Nb і Zr, відповідно, а також додаткові процедури відпалу були досліджені з метою отримання рекомендацій щодо базованих на

знаннях сплавів сталей з підвищеним співвідношенням жорсткості/щільності і достатньо високою пластичністю. Було виявлено, що всі легуючі елементи збільшують розмір грубих первинних частинок TiB₂, тоді як Co забезпечує найбільш однорідний розподіл розмірів. Розмір евтектичних компонентів TiB₂ був зменшений усіма легуючими добавками, крім Ni, в той час як їх аспектне співвідношення мало вплинуло. Таким чином, додавання Co та Cr є найкращою відправною точкою для розробки нових високомодульних композиційних сталей з металевою матрицею *in situ*, тоді як використання Mn у поєднанні з термомеханічною обробкою найбільше підходить для адаптації мікроструктури матриці та оптимізації частинок/матриці процеси спільної деформації.

Jun-xia Huang, Xiao-ning Ye, Zhou Xu [7] дослідили зміну мікроструктури та механічних властивостей метастабільних аустенітних нержавіючих сталей AISI 301LN під час холодної прокатки. Холодне зменшення товщини в широкому діапазоні (10% — 80%) проводили в чотиривалковому стані при температурі навколишнього середовища. Рентген і Feritscope MP30 були використані для ідентифікації спричиненої деформацією α' -мартенситної фази та її об'ємної частки відповідно. Мікроструктуру спостерігали за допомогою оптичної мікрофотографії, а механічні властивості визначали за допомогою випробувань на розтяг і мікротвердість. Результати показали, що індукований деформацією α' -мартенсит зароджувався на перетинах смуг зсуву, а ріст α' -мартенситу відбувався шляхом повторного зародження нових ембріонів. Об'ємна частка α' -мартенситу, спричиненого деформацією, зростала зі збільшенням скорочення холодної прокатки. Крім того, відсоток збільшення міцності на розрив такий же, як і твердості.

Вагомий внесок у розробку теорії щодо використання сплавів на основі заліза внесли вітчизняні дослідники Акімов О. В., Борисова А. Л., В. Ф. Горбань, А. І. Дегула, М. В. Карпець, О. М. Крапівка, О. С. Макаренко, С. В. Марченко, М. В. Мисливченко, В. А. Назаренко, А. В. Самелюк, Рудь О. Д. та інші [7-11]. Так, у дисертаційному дослідженні М. В. Мисливченко вперше систематично досліджено фазовий склад, мікроструктуру та фізико-механічні властивості сплавів системи Cr-Ni-Co-Fe-Cu-Al в концентраційному інтервалі (0-3 моль) вмісту хімічних елементів [12]. Встановлено, що в дослідженій системі внаслідок високої ентропії змішування утворюються лише прості тверді розчини заміщення на основі ГЦК та ОЦК структур, які характеризуються високим комплексом фізико-механічних властивостей, не притаманних жодному із складових компонентів.

Обґрунтовано, що основним фактором фазоутворення у високоентропійних сплавах є величина середньої електронної концентрації сплаву. Інтервал значень середньої електронної концентрації, в якому існують ОЦК чи ГЦК структури, залежить від швидкості кристалізації

розплаву та наявності в сплаві елементів, схильних до ліквідації. Встановлено елементи-стабілізатори твердих розчинів на основі фаз з ОЦК (Al, Cr) та ГЦК (Cu, Ni, Co) структурами.

Суттєвим науковим досягненням слід вважати вперше розроблений високоентропійний сплав CrMnFeCoNi₂Cu на основі твердого розчину зі структурою ГЦК фази, здатний деформуватись прокаткою при кімнатній температурі на 98 % без появи тріщин або надривів. Досліджено його фазовий склад, мікроструктуру та фізико-механічні властивості на усіх етапах деформування.

В науковій роботі М.В.Мисливченко показано, що в Україні вперше при холодній прокатці у високоентропійному сплаві CrMnFeCoNi₂Cu, подібно до чистих металів та сплавів з ГЦК-структурою, виникає текстура прокатки з основною компонентою.

При визначенні термічної стабільності структури, фазового складу та фізико-механічних властивостей сплаву CrMnFeCoNi₂Cu встановлено, що рівень мікротвердості сплаву деформованого на 98 % зберігається до температури відпалу 1273 К (0,84 Тплавл), а наноструктурний стан до 1073 К (0,7 Тплавл).

Вперше науково обґрунтовано, що відпал сплаву CrMnFeCoNi₂Cu деформованого на 98 %, до 1273 К сприяє гомогенізації і утворенню однофазного твердого розчину на основі фази з ГЦК-структурою. При відпалі вище 1273 К відбувається виділення ГЦК₂ фазової складової по межах зерен.

Вперше також розроблено систему високоентропійних сплавів (ВЕСів) CrMnFeCoNi_xV, стійких в умовах абразивного зношування. Встановлено коефіцієнт відносної зносостійкості сплавів VCrMnFeCoNi₂, VCrMnFeCoNi_{1,5}, VCrMnFeCoNi при терті по нежорстко закріпленим абразивним частинкам. Показано, що сплав VCrMnFeCoNi, в складі якого міститься найбільша кількість □-фази по значенню коефіцієнта зносостійкості не поступається зносостійкому покриттю, наплавленому штучним електродом Т590.

Теорії щодо фазоутворення та формування властивостей також обмежуються сплавами на основі одного чи двох елементів. Такий дисбаланс стає більш яскраво вираженим зі збільшенням кількості компонентів, що входять до сплаву. Для п'ятикомпонентних систем і систем вищого порядку інформація про сплави, які знаходяться в центрі діаграми стану, нині відсутня. Все це призводить до зменшення кількості сплавів, які можуть використовуватися для отримання матеріалів та покриттів різного призначення. Успішною спробою розробити нові багатокомпонентні матеріали є створення високоентропійних сплавів (ВЕСів), які є комбінацією декількох елементів, переважно не менш як п'яти, змішаних у приблизно рівних атомних пропорціях. В цьому випадку ентропія змішування елементів розплаву набуває максимального значення і її

вклад перевищує ентальпію утворення певних дво- та трьохкомпонентних інтерметалічних фаз, що є основною причиною відмінності фазоутворення та формування властивостей між ВЕСами і традиційними сплавами. Як наслідок, у багатьох випадках при кристалізації ВЕСів утворюються лише прості тверді розчини заміщення на основі ГЦК та ОЦК ґраток. Підвищений інтерес багатьох вчених до ВЕСів як нових матеріалів, що можуть знайти практичне застосування, зумовлений властивостями, які вони демонструють. У першу чергу це їхня висока міцність в литому, відпаленому та деформованому станах у широкому інтервалі температур. Вона досягається внаслідок значного спотворення кристалічної ґратки (твердорозчинного зміцнення), що обумовлене наявністю в ній атомів різнорідних металів. Разом з тим можливе додаткове зміцнення в результаті формування наноструктур або структур, зумовлених спінодальним розпадом. Крім високої міцності ВЕСи характеризуються високою твердістю в литому і відпаленому станах. Для цього класу сплавів характерні термостабільність структури, властивостей, та висока зносостійкість. Однією з корисних властивостей ВЕСів є можливість впливу на їх фазовий склад та структуру за допомогою зміни значення середньої електронної концентрації сплаву: $i N_i$ і $VEC \sum c_i \cdot z_i = 1$, де $c_i < 1$ - концентрація елемента в ат. %, n – число компонентів у сплаві, N_i – кількість електронів на зовнішніх орбіталях атома i -го елемента ($s+d$ орбіталі для d -елементів та $s+p$ для p -елементів). Це дає змогу регулювати показники фізико-механічних властивостей сплаву, без використання складних режимів термічної обробки. Однак, на даний момент, літературні дані про вплив концентрації хімічних елементів у ВЕСах на утворення заданих структур мають обмежений характер.

Висновки. Вивчення змін структури нового класу сплавів, а також встановлення зв'язків між хімічним і фазовим складом, структурою та фізико-механічними властивостями є визначеними завданнями металознавства та термічної обробки металів як галузі науки. Зазначені в роботі та інші дослідження відкривають можливість істотної модифікації структурного та фазового стану високоентропійних сплавів, які становлять значний інтерес для машинобудування.

Список використаної літератури:

- 1.URL: <https://metinvestholding.com/ua/media/news/samie-prochnie-metalli-na-zemle>.
- 2.Федорченко И. М., Андриевский Р. А. Порошковая металлургия. К., 1963.
- 3.Ахизер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В. Спиновые волны. Москва, 1967.
- 4.Kittel J., Frost B., Mustelier J., Bagley K., Crittenden G., and Van Dievoet J. History of fast reactor fuel development // Journal of nuclear materials. – 1993. – vol. 204. – pp. 1-13.
- 5.Klueh R., and Harries D. High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications. West Conshohocken, PA : ASTM International. 2001, p. 221.

6.Томас С., Марсель А. Дж. С. Контрольоване розчинення колосальних кількостей азоту в нержавіючій сталі // Металургійні та матеріальні угоди. – 2006. – 37А. – р. 675.

7.Conn R., Bloom E., Davis J., Gold R., Little R., Schultz K., Smith D., and Wiffen F. Panel report on low activation materials for fusion applications // Journal of Nuclear Materials. – 1983. – vol. 122. – pp. 17–26.

8.Карпець М. В. Властивості багатокомпонентного високоентропійного сплаву AlCrFeCoNi легованного міддю / М. В. Карпець, О. М. Мисливченко, О. С. Макаренко, О. М. Крапівка, В. Ф. Горбань, А. В. Самелюк // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – №2. – С. 103–111.

9.Карпець М. В. Вплив пластичної деформації на фазовий склад, текстуру та механічні властивості високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi₂Cu / М. В. Карпець, О. М. Мисливченко, М. О. Крапівка, В. Ф. Горбань, О. С. Макаренко, В. А. Назаренко // Надтверді матеріали. – 2015. – №1. – С. 30–36.

10.Карпець М. В. Влияние содержания Ni на износостойкость литого высокоэнтропийного сплава VCrMnFeCoNi_x / М. В. Карпец, В. Ф. Горбань, А. Н. Мысливченко, С. В. Марченко, Н. А. Крапивка // Современная электротехнология. – 2015. – №1. – С. 56–60.

11.Карпець М. В. Вплив нікелю на структуру та фазовий склад високоентропійного сплаву VCrMnFeCoNi_x / М. В. Карпець, О. М. Мисливченко, О. С. Макаренко, В. Ф. Горбань, М. О. Крапівка, А. І. Дегула // Надтверді матеріали. – 2015. – №3. – С. 52–60.

12.Карпець М. В. Механічні властивості та особливості формування фаз в високоентропійних сплавах системи CrFeNiCuCoAl_x / М. В. Карпец, О. М. Мисливченко, О. С. Макаренко, В. Ф. Горбань, М. О. Крапівка // Порошкова металургія. – 2015. – №5/6. – С. 116–126.

13.Мисливченко О. М. Особливості структуроутворення та властивості високоентропійних сплавів системи. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Київ, 2016.

References:

- 1.Available at: <https://metinvestholding.com/ua/media/news/samie-prochnie-metalli-na-zemle>.
- 2.Fedorchenko I. M., Andrievskij R. A. Poroshkovaya metallurgiya. K., 1963.
- 3.Ahiezher A. I., Baryahhtar V. G., Peletminskij S. V. Spinovye volny. Moskva, 1967.
- 4.Kittel J., Frost B., Mustelier J., Bagley K., Crittenden G., and Van Dievoet J. History of fast reactor fuel developmen. Journal of nuclear materials. 1993. vol. 204. pp. 1-13.
- 5.Klueh R., and Harries D. High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications. West Conshohocken, PA. ASTM International. 2001. p. 221.
- 6.Tomas S., Marsel A. Dzh. S. Kontrolovane rozchinennya kolosalnih kilkostej azotu v nerzhaviyuchij stali. Metalurgijni ta materialni ugodi. 2006. 37A. 675.
- 7.Conn R., Bloom E., Davis J., Gold R., Little R., Schultz K., Smith D., and Wiffen F. Panel report on low activation materials for fusion applications, Journal of Nuclear Materials. 1983. vol. 122. pp. 17–26.
- 8.Karpec M. V., Mislivchenko O. M., Makarenko O. S., Krapivka O. M., Gorban V. F., Samelyuk A. V. Vlastivosti bagatokomponentnogo visokoentropijnogo splavu AlCrFeCoNi legovannogo middyu. Problemi tertya ta znoshuvannya. 2014. №2. P. 103–111.
- 9.Karpec M. V., Mislivchenko O. M., Krapivka M. O., Gorban V. F., Makarenko O. S., Nazarenko V. A. Vpliv plastichnoyi deformaciyi na fazovij sklad, teksturu ta mehanichni vlastivosti visokoentropijnogo splavu CrMnFeCoNi₂Cu. Nadtverdi materiali. 2015. №1. P. 30–36.
- 10.Karpec M. V., Gorban V. F., Myslivchenko A. N., Marchenko S. V., Krapivka N. A. Vliyanie sodержaniya Ni na iznosostojkost litogo vysokoentropijnogo splava VCrMnFeCoNih. Sovremennaya elektrometallurgiya. 2015. №1. P. 56–60.
- 11.Karpec M. V., Mislivchenko O. M., Makarenko O. S., Gorban V. F., Krapivka M. O., Degula A. I. Vpliv nikelyu na strukturu ta fazovij sklad visokoentropijnogo splavu VCrMnFeCoNih. Nadtverdi materiali. 2015. №3. P. 52–60.
- 12.Karpec M. V., Mislivchenko O. M., Makarenko O. S., Gorban V. F., Krapivka M. O. Mehanichni vlastivosti ta osoblivosti formuvannya faz v visokoentropijnih splavah sistemi CrFeNiCuCoAl_x. Poroshkova metallurgiya. 2015. №5/6. P. 116–126.
- 13.Mislivchenko O. M. Osoblivosti strukturoutvorennya ta vlastivosti visokoentropijnih splaviv sistmi. Disertaciya na zdobuttya naukovogo stupenya kandidata tehnicnih nauk. Kiyiv, 2016.

Надійшла до редакції 10.05.2022р.