

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича

РЕФЕРАТ

роботи: «Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями»

- | | |
|---|--|
| Горбань
<i>Віктор Федорович</i> | Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України |
| Фірстов
<i>Георгій Сергійович</i> | Доктор фізико-математичних наук, заступник директора Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України |
| Андрєєв
<i>Анатолій Опанасович</i> | Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Національного наукового центру Харківський фізико-технічний інститут НАН України |
| Карпець
<i>Мирослав Васильович</i> | Доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України |
| Крапивка
<i>Микола Олександрович</i> | Кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України |
| Рогуль
<i>Тамара Григорівна</i> | Кандидат фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України |
| Табачнікова
<i>Олена Дмитрівна</i> | Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України |
| Бродніковський
<i>Микола Павлович</i> | Кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України |

Київ – 2020

Необхідність реалізації інноваційних технологій в промисловості України потребує розробки нових матеріалів з унікальними властивостями, оскільки існуючі традиційні матеріали не завжди забезпечують високий рівень експлуатаційних характеристик виробів, що істотно звужує конструкторські можливості та обмежує конкурентну спроможність на світовому і внутрішньому ринках.

Метою роботи є розроблення наукових основ створення принципово нового класу матеріалів – багатоелементних сплавів (високоентропійних сплавів (ВЕС)) з регульованою структурою і високим комплексом фізико-механічних та функціональних властивостей (зокрема, з поєднанням високотемпературної міцності і низькотемпературної пластичності, жаростійкістю, сплавів з ефектом пам'яті форми, тощо), які будуть конкурентоспроможними в порівнянні з відомими традиційними сплавами.

Наукова новизна. В представленій роботі поєднано **оригінальні розробки авторами методів структурної інженерії матеріалів** у мікро- та наноструктурованих станах з використанням **концепції „корисних” домішок** (легуючих елементів) та інженерії меж поділу з метою отримання гранично високого зміцнення, методів управління фазовими (мартенситними) перетвореннями та нові можливості їх органічного використання при переході від досліджень та розробок переважно бінарних і потрійних сплавів та сполук до мультикомпонентних (високоентропійних) матеріалів. Дослідження професора *J.W.Yeh* з Тайваню та його учнів започаткували у 2004 р. **абсолютно новий напрямок у матеріалознавстві, пов'язаний із використанням мультикомпонентних (високоентропійних) матеріалів.**

Авторами у 2006 році вперше на території колишнього СРСР і саме в Україні розпочато дослідження в розробці матеріалів на основі мультикомпонентних систем. **Поєднання цих підходів дозволило створити новий напрямок досліджень – з'ясування закономірностей формування властивостей та структури матеріалів на рівні атомної інженерії в полікомпонентних системах, що дозволило отримати на ряді матеріалів унікальні фізико-механічні властивості.**

Основні результати

1. Створено теоретичні основи формування граничнозміцнених станів.

Вперше отримано узагальнене рівняння типу Холла-Петча, яке враховує зміну атомного мікромеханізму зміцнення полікристалів у різних діапазонах розмірів зерен, розділених як мінімум двома критичними розмірами при переході від мікро- до наноструктурованого стану, та передбачає **можливість досягнення гранично високого зміцнення до рівня так званої „теоретичної” міцності в сплавах у діапазоні значень $E/2\pi$ - $E/30$, у той час, як зазвичай міцність, так званих „високоміцних” матеріалів не перевищує $E/100$ – $E/150$, рис1.** Для експресної оцінки рівня

зміцнення введено уявлення про „теоретичну” твердість, максимальні значення якої не перевищують значень $E/5$ - $E/10$.

На основі запропонованої авторами концепції „корисних” домішок („корисного” легування, яке дозволяє заліковувати „слабкі місця” на межах поділу) для підвищення механічних властивостей наноструктурованих матеріалів шляхом інженерії меж зерен експериментально показано, що рівень теоретичної міцності може бути досягнутий не тільки для наноструктурованих тонких плівок та покриттів, але і для наноструктурованих „об’ємних” матеріалів.

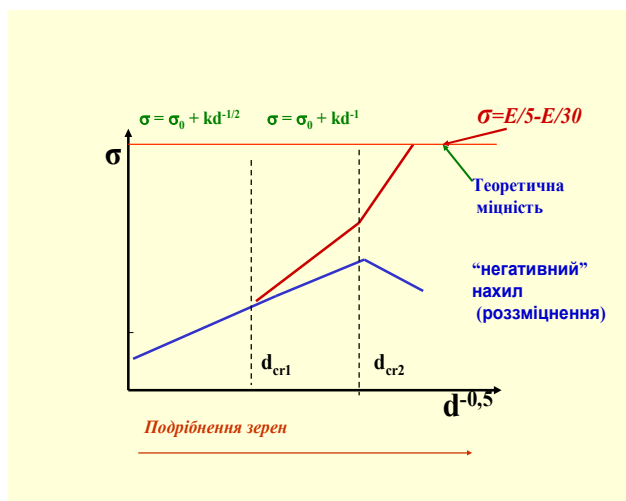


Рис. 1. „Корисне” легування меж поділу дозволяє отримати теоретично можливий рівень міцності.

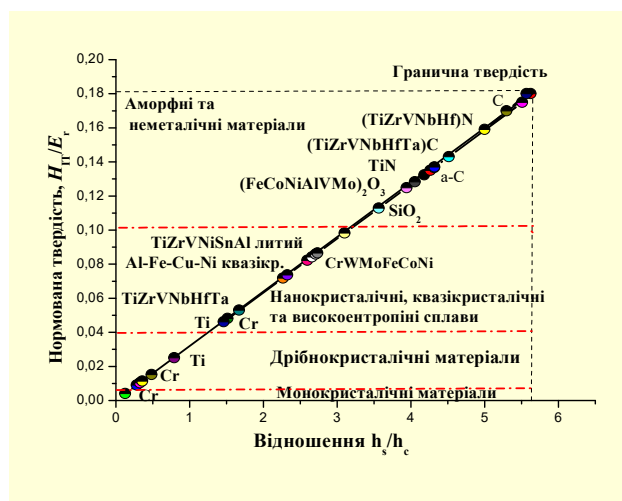


Рис. 2. Оцінка механічних властивостей та структурного стану матеріалів методами автоматичного індентування.

Знайдено, що у полікомпонентних середньоентропійних системах (3-4 елементи) та високоентропійних (5 та більше елементів) спрацьовує механізм „заліковування слабких місць” за рахунок пікомасштабних зрушень атомів різних сортів та розмірів, які знижують енергію меж поділу, підвищують міжзеренну міцність та спротив міжзеренному проковзуванню при підвищених температурах.

Отримане оригінальне „рівняння індентування”, яке дозволило широко використати методи автоматичного індентування для експресної оцінки механічних властивостей та структурного стану досліджуваних матеріалів. На рис. 2 наведено дані по залежності (H/E_r) від (h_s/h_c) , де H – твердість, E_r – ефективний модуль пружності, h_s та h_c – характеристики занурення індентора. Добре видно, що на цьому графіку матеріали розташовуються між найтвердішим алмазом та відносно „м’якими” металевими сплавами. Водночас, наноструктуровані та полікомпонентні (у тому числі високоентропійні) матеріали демонструють значення нормованої на ефективний модуль Юнга твердості, які наближаються до „теоретичної” величини, а високоентропійні нітридні покриття – значення, близькі до алмазу.

2. Узагальнено вплив електронної концентрації, розміру атомів, ентальпії змішування на фазовий склад, параметри ґратки, дисторсії та властивості полікомпонентних сплавів (ВЕС) з різним рівнем ентропії.

З метою обґрунтованого вибору перспективних складів ВЕС, яких, зрозуміло, може бути безліч, запропоновано використовувати встановлені закономірності формування різних типів кристалічної ґратки від електронної концентрації. На рис. 3 наведено отриману авторами типову залежність модуля пружності низки полікомпонентних матеріалів від електронної концентрації із одночасним визначенням меж існування твердих розчинів полікомпонентних матеріалів з ГЦУ, ОЦК, ГЦК та ОЦК+ГЦК ґратками. Видно, що стабільність фаз із різним типом ґраток у цілому відповідає раніше виконаним розрахункам Кауфмана та Петтіфора для чистих металів та бінарних сплавів. Крім того, на цю залежність нанесено області розташування твердих розчинів, що схильні до крихкого або пластичного руйнування. З точки зору досягнення оптимального співвідношення міцності та пластичності бажано вибирати склади, що демонструють не тільки пластичність, але і мають достатньо високі значення модуля пружності. Це суттєво спрощує напрямки пошуку оптимальних складів.

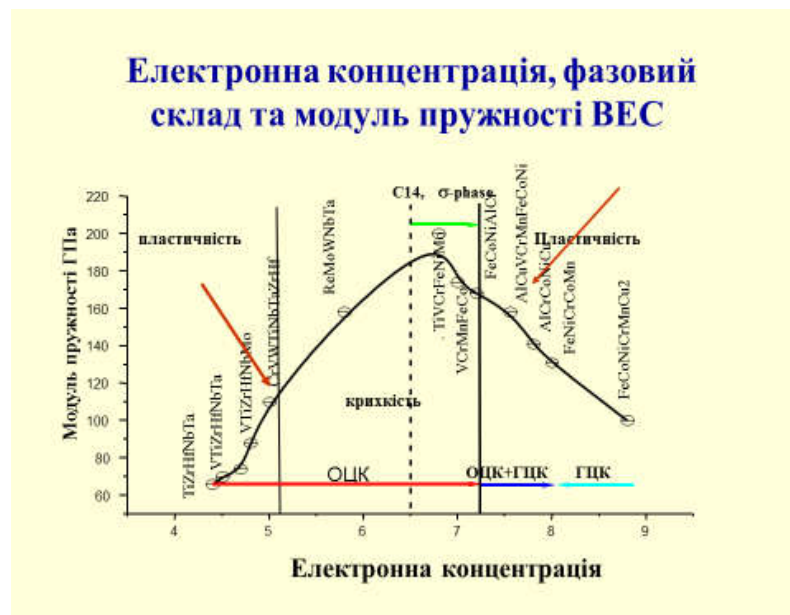


Рис. 3. Вплив електронної концентрації на фазовий стан, модуль пружності та області існування крихких та пластичних станів.

Встановлено, що при електронних концентраціях, які відповідають межі стабільності фаз (показано стрілками), можливим є прояв мартенситних перетворень, що дозволяє розроблення принципово нових сплавів та сполук, які демонструють надпружну поведінку та ефект пам'яті форми.

3. Вперше отримано новий клас полікомпонентних сполук (карбідів, нітридів), фаз Лавеса, σ - і μ -фаз та інтерметалідів з мартенситним перетворенням.

Визначено області співіснування високоентропійних твердих розчинів та інтерметалідних фаз Лавеса, σ -фаз та μ -фаз, а також умови, які необхідні для отримання 100 % високоентропійних інтерметалідних фаз, що враховують термодинамічні параметри та співвідношення атомних розмірів елементів. Слід зазначити, що **результати, які отримані на цьому напрямку, відкривають епоху розроблення принципово нових матеріалів із унікальним рівнем властивостей на основі полікомпонентних інтерметалідів та сполук**, оскільки до останнього часу переважно досліджувалися та використовувалися бінарні або потрійні сполуки. Полікомпонентні інтерметаліди відрізняються високою твердістю, а відношення H/E^* сягає значень 0,1-0,13, що практично відповідає значенням „теоретичної” твердості. Зокрема отримано 26-компонентну фазу Лавеса. Знайдено склади полікомпонентних карбідів та нітридів, твердість яких на 25-30% перевищує твердість будь якої бінарної сполуки.

Варіювання стехіометрії полікомпонентних інтерметалідів, електронна концентрація яких знаходиться в області 4-4,5 та 7,5 ел/атом, відкриває можливість отримувати мартенситні перетворення у широкому діапазоні температур.

4. З'ясовано природу аномального твердорозчинного зміцнення полікомпонентних систем та розроблено наукові основи створення як нового покоління жароміцних сплавів на основі ВЕС, так і матеріалів перспективних для криогенного застосування.

На відміну від переважної більшості публікацій, у яких твердорозчинне зміцнення розглядалося тільки як температурно незалежне, за допомогою термоактиваційного аналізу вперше чітко розділено вплив особливостей будови полікомпонентних твердих розчинів (дисторсії кристалічної ґратки, нанокластерна будова, тощо) на „атермічну” та температурозалежну складову межі плинності, рис. 4а. Вперше встановлено, що високе атермічне твердорозчинне зміцнення полікомпонентних твердих розчинів спричинене підвищенням спротиву руху дислокацій появою нормальної до площини зсуву компоненти вектора Бюргерса, що обумовлено пікорівневими дисторсіями кристалічної ґратки, рис. 4б. Запропоновано відносно простий вираз для оцінки твердорозчинного зміцнення полікомпонентних твердих розчинів, який включає емпіричне («середнє») значення модуля зсуву та «середній» параметр розмірної невідповідності (однієї з характеристик дисторсії кристалічної ґратки), які можуть регулюватися складом матеріалу.

Це дозволило запропонувати нові підходи до створення жароміцних систем, а вивчення температурної залежності дозволило на атомному рівні як встановити особливості руху дислокацій, так і запропонувати нові склади матеріалів, які придатні для експлуатації при криогенних температурах. Так, вперше для нееквіатомних ВЕС $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ (TWIP), $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ (TRIP) та $Co_{17.5}Cr_{12.5}Fe_{55}Ni_{10}Mo_5$ було зареєстровано рекордне співвідношення міцності та пластичності (на рівні міцності ~ 1000 МПа та пластичності ~ 40 -

50%), що при 20 К вдвічі перевищує пластичність відомої криогенної сталі 12X18H10T.

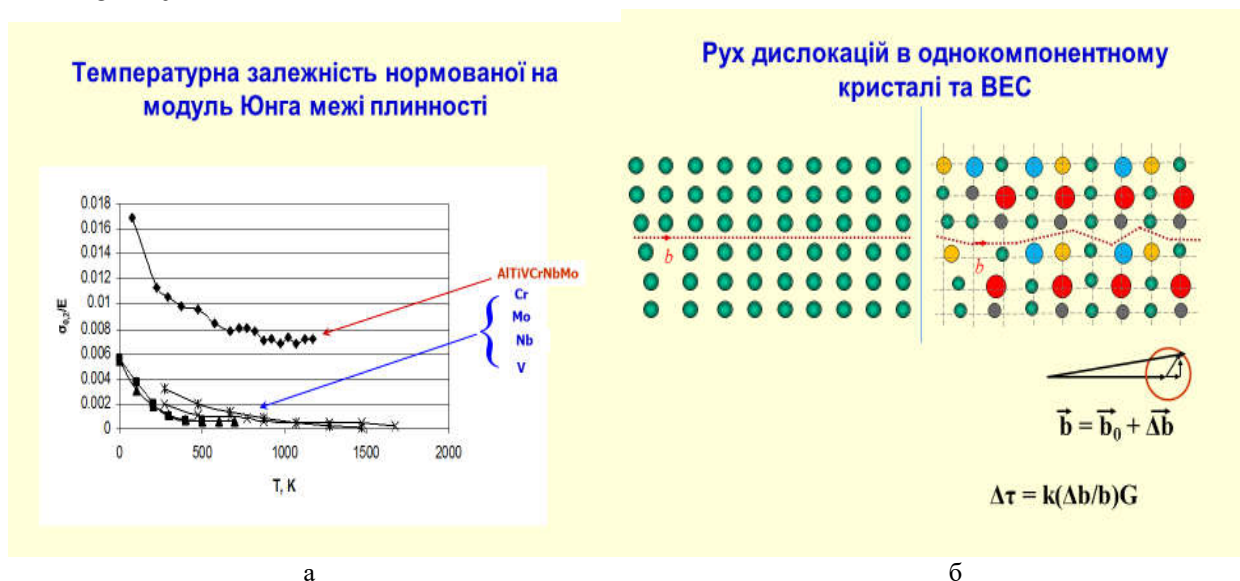


Рис. 4. Аномально високе атермічне зміцнення ВЕС у порівнянні з металами та підсилення температурнозалежної складової межі плинності (а); особливості руху дислокацій у спотвореній пікорівневими дисторсіями кристалічній ґратці ВЕС (б).

5. Нові жароміцні сплави та композити. Вперше встановлено, що у спеціально сконструйованих ВЕСах високе „атермічне” зміцнення (характерне „плато” на температурній залежності напруження плинності) може існувати у більш широкому інтервалі температур $(0,2-0,6)T_{пл}$ на відміну від традиційних сплавів, для яких „плато” спостерігається у більш „вузькому” інтервалі температур $(0,2-0,35)T_{пл}$. Наявності такого „плато” (рис. 5) сприяють бар’єри для руху дислокацій, які не можуть бути подоланими за допомогою термічних флуктуацій. До таких бар’єрів відносяться межі зерен, усереднені поля напружень, зумовлені існуванням пікорівневих статичних спотворень, специфічні нанокластерні структури пов’язані із нанорозмірною неоднорідністю складу, частки других фаз. Іншою причиною покращення жароміцності полікристалічних високоентропійних сплавів є відзначене вище специфічне „заліковування” слабких місць у межах поділу, що утруднює високотемпературне проковзування по границях зерен і принципово відкриває шлях до створення жароміцних полікристалічних матеріалів, які за своїми властивостями наближаються до високовартісних жароміцних монокристалів. На рис. 6 наведено температурні залежності межі плинності двох кращих жароміцних матеріалів (типу Інконель та Хейнес) у порівнянні із високоентропійними сплавами.

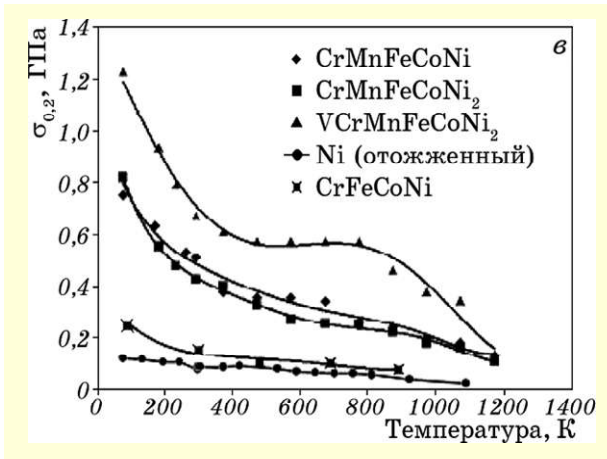


Рис. 5. Підсилення температурнозалежної та атермічної складових напруження плинності в ГЦК-ВЕС. Поява плато.

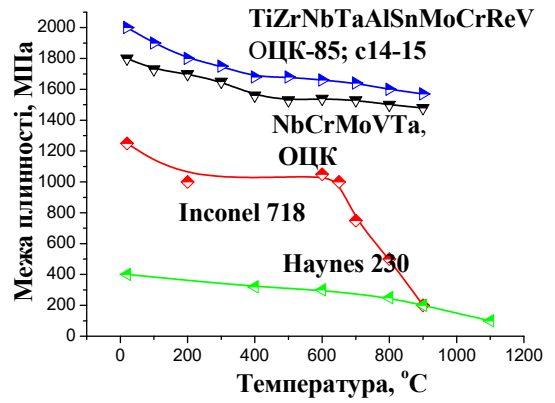


Рис. 6. Температурна залежність межі плинності двох кращих жароміцних матеріалів (Інконель та Хейнес) у порівнянні з високоентропійними.

Отримані результати свідчать про можливість створення нового покоління жароміцних матеріалів. Запропоновано дві групи високоентропійних сплавів із зниженою питомою вагою, які можуть розглядатися як конкуренти жароміцним сплавам на нікелевій основі та жароміцним сплавам на основі гамма-алюмінідів титану.

Встановлено, що високоентропійні сплави можуть розглядатися, як основа (матриця) для створення новітніх композитів. Отримано композит на основі високоентропійної матриці, зміцненої оксидними волокнами, межа плинності якого при 1200 °С складає 250 МПа, рис. 7.

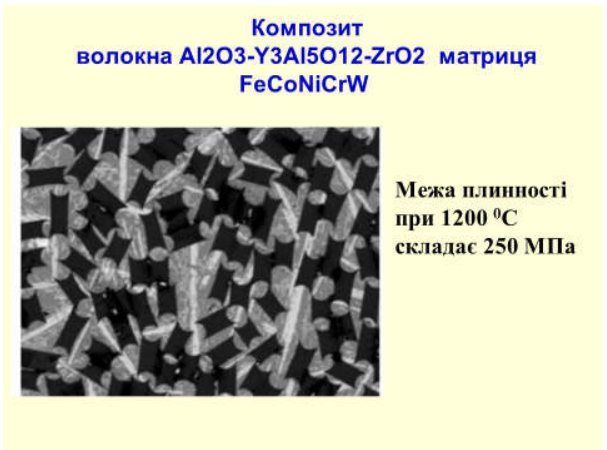


Рис. 7. Композит на основі високоентропійної матриці, зміцненої оксидними волокнами.

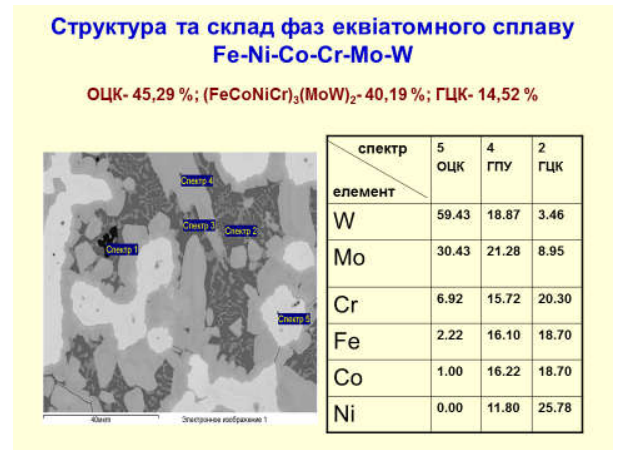


Рис. 8. „In situ” – композит на основі сплаву FeCoNiCrMoW.

Крім того, поліфазні високоентропійні сплави, які просто можуть бути отримані методами литва, можуть розглядатися, як природні „in situ” – композити. Типова структура такого трьохфазного сплаву наведена на рис. 8.

Створено низку сплавів на основі запропонованої системи Nb-Ti-Al, легованої Cr, Zr, Mo та Si, з низькою щільністю (≤ 7 г/см³), в яких

жароміцність, жаростійкість та пластичність оптимізовані згідно різним практичним вимогам.

Отримано як однофазні сплави, так і евтектики, в яких температура плавлення знаходиться в межах 1450 – 1850 °С. **Розроблені** багатоелементні ливарні сплави та сплави, які придатні для деформування. Важливим результатом роботи є **підвищення жаростійкості** сплавів ніобію завдяки легування його Cr та Si.

Для **розроблених багатоелементних сплавів** **відпрацьована технологія** лазерного зварювання. **Знайдено** оптимальне співвідношення потужності та швидкості руху лазерного променя для зменшення градієнту температур та, відповідно, збільшення міцності шву.

6. Структурна інженерія покриттів.

Узагальнено закономірності структуроутворення металевих, нітридних, карбідних і оксидних полікомпонентних (високоентропійних) покриттів, отриманих методами вакуумно-плазмового розпилення і розпилення у плазмі вакуумного (стиснутого) газового розряду. Твердість високоентропійних карбідів, отриманих іонним розпиленням сплавів TiZrHfVNbTa і AlCrFeCoNiCuV у плазмі стисненого газового вакуумно-дугового розряду суміші аргону і ацетилену, сягає 43-48 ГПа. Твердість оксидних покриттів, отриманих зі сплаву FeCoNiAlVMo, становить 33-35 ГПа, модуль пружності – 280-285 ГПа. Для збільшення твердості покриттів вперше використана технологія іонної імплантації за рахунок подачі на деталь імпульсів від’ємного потенціалу 2000 В, з частотою 7 кГц. Така технологія забезпечує отримання нітридних високоентропійних покриттів у діапазоні температур підкладки від 100 °С до 350 °С з твердістю до 64 ГПа (рис. 9) і дає можливість наносити надтверді покриття на інструментальні сталі.

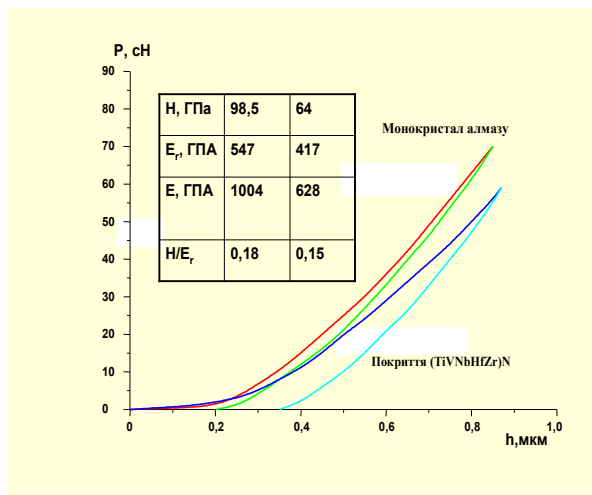


Рис. 9. $P(h)$ криві індентування алмазу та покриття (TiVNbHfZr)N

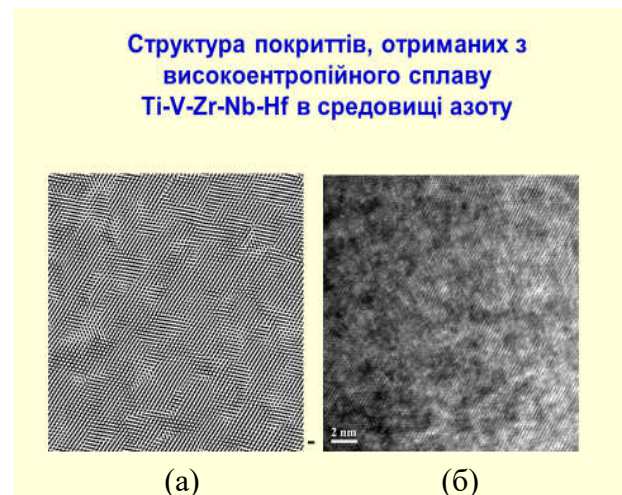


Рис. 10 Нанокластерна структура (а), що виявляється після подвійної Фур'є обробки електронномікроскопічного зображення (б).

Відношення H_{IT}/E_r на таких покриттях сягає значень 0,15, що близько до теоретичної твердості 0,18. Високі показники твердості досягаються за рахунок кластерної будови покриттів (рис. 10).

7. Нові полікомпонентні (у тому числі високоентропійні) сплави з високотемпературним ефектом пам'яті форми.

Закладено наукові засади створення високотемпературних сплавів з пам'яттю форми. Найбільш важливі результати отримані на подвійних та полікомпонентних інтерметалідах, що складаються із трьох- шести та більше компонентів. Отримано феноменологічне рівняння, яке дозволяє розрахувати температури мартенситних перетворень з урахуванням особливості електронної будови та кристалічної структури. Встановлені закономірності були підтверджені експериментально та дозволяють свідомо конструювати матеріали з високотемпературним ефектом пам'яті форми. Встановлено, що крім цих факторів, зменшення щільності мартенситних фаз підвищує вібраційну складову ентропії і сприяє створенню сплавів із високотемпературним ефектом пам'яті форми. Зокрема, якщо в більшості попередніх робіт сплави з ефектом пам'яті форми розроблювалися та використовувалися до температур нижче 120 °С, то у даному циклі робіт вперше отримано сплави з надвисокотемпературним ЕПФ. Так, для багатокомпонентних сполук на основі ZrCu з додаванням Ni, Co та Ti продемонстровано повернення форми у 2-5% у інтервалі температур від **120 °С до 650 °С**. Надвисокотемпературний ЕПФ отримано на бінарному інтерметаліді HfIr (1% оберненої деформації при 1000 °С). **Втім на бінарних системах не вдається мінімізувати непружні явища, які обумовлені дислокаційними процесами.**

Ці негативні явища вдалося подолати **переходом до полікомпонентних середньо- та високоентропійних сплавів**. Вперше встановлено, **що наявність дисторсій кристалічної ґратки, притаманних полікомпонентним сплавам, суттєво обмежує прояв дислокаційної непружності і водночас практично не заважає власне мартенситному перетворенню**. Встановлено зниження симетрії за рахунок триклінних викривлень ґратки високотемпературної впорядкованої фази B2, що додатково покращує повноту відновлення форми. Цілеспрямовано отримано мартенситне перетворення у багатокомпонентній інтерметалічній сполуці, близькій до еквіатомного складу TiZrHfCoNiCu з високою ентропією змішування, яке супроводжувалося стабільною пам'яттю форми 2-3% оберненої деформації в широкому температурному інтервалі -196 °С ÷ 650 °С (рис. 11).

Показано, що окислення сплавів з пам'яттю форми, включаючи високотемпературні та високоентропійні, відбувається через перерозподіл елементів у поверхневих шарах і може бути використано для утворення захисного шару, який потрібен, зокрема, для запобігання крихкого руйнування за експлуатації при високих температурах. При цьому отримано результат важливий для підвищення біосумісності імплантів з нікеліду

титану, а саме, знайдено режими низькотемпературного окислення, за яких виключається поява канцерогенного нікелю в поверхневих шарах.

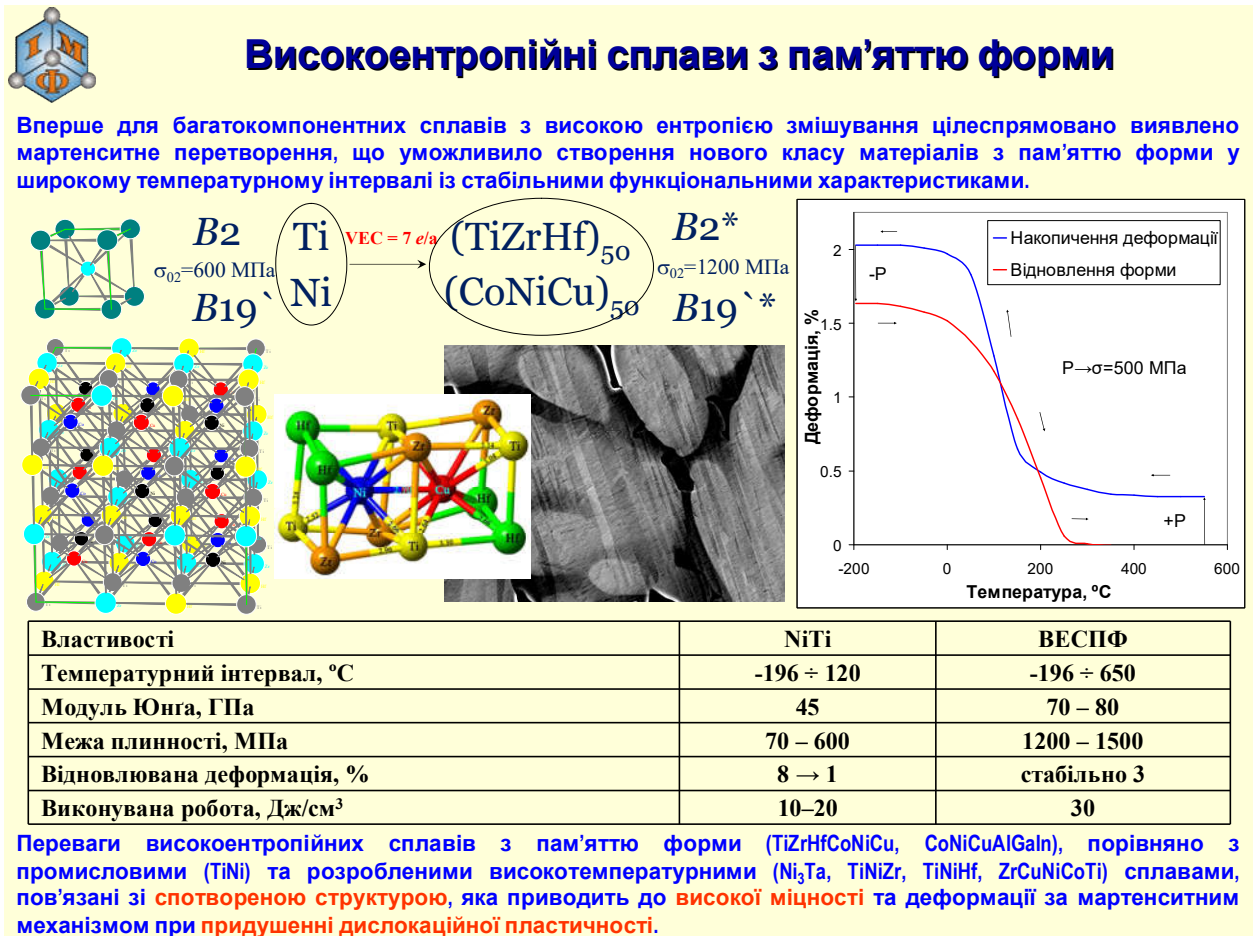


Рис. 11. Властивості багатокомпонентних інтерметалічних сполук з мартенситним перетворенням та високою ентропією змішування - високоентропійних сплавів з пам'яттю форми (ВЕСПФ).

Отримані результати дозволили запропонувати світовій спільноті новий клас функціональних матеріалів - високоентропійні сплави з пам'яттю форми. Саме такою назвою вони позначаються у сучасній науковій літературі.

Практична цінність:

- створено теоретичні основи формування граничнозміцнених станів з використанням концепції “корисного легування”; експериментально підтверджено можливість досягнення „теоретичної” міцності (твердості);
- розроблена методологія експресної оцінки рівня зміцнення та структурного стану металів та покриттів методами автоматичного індентування;
- з’ясовано закономірності впливу електронної концентрації, ентальпії змішування, параметру ґратки, дисторсій на структуру та властивості полікомпонентних сплавів. Запропоновано підходи для вибору

складів полікомпонентних сплавів з необхідними фізико-механічними властивостями;

– започатковано новий напрямок у матеріалознавстві – розроблення полікомпонентних (високоентропійних) інтерметалідів та сполук з унікальними властивостями;

– встановлено природу аномально високого твердорозчинного атермічного зміцнення та принципову можливість розробки новітніх високоентропійних сплавів (ВЕСів), здатних замінити сплави типу Inconel та Neupres для температур експлуатації 800-1050 °С та вище;

– створено низку жароміцних, жаростійких та водночас пластичних середньоентропійних сплавів на основі ніобію із зниженою питомою вагою (6,4 - 7,2 г/см³) з можливістю експлуатації при температурах 1150-1200 °С; відпрацьована технологія лазерного зварювання;

– отримано композиційний матеріал «ВЕС-оксидне волокно», який має високі характеристики міцності при 1200 °С на рівні 250 МПа;

– запропоновано полікомпонентні сплави для криогенного застосування, у яких поєднуються високі характеристики міцності та пластичності;

– розроблена технологія нанесення високоентропійних нітридних надтвердих покриттів на інструменти;

– створено нові матеріали з ефектом пам'яті форми при підвищених температурах, які завдяки наявності дисторсій кристалічної ґратки демонструють стабільні властивості в інтервалі температур до 650 °С;

– отримано результат важливий для підвищення біосумісності імплантів з нікеліду титану.

Практичне використання: високий рівень отриманих результатів по розробленню багатоелементних жароміцних, жаростійких сплавів з низькою питомою вагою забезпечив їх застосування у кінцевих користувачів:

• По замовленню КБ “Південне” та Нанкінської корпорації “Чень Гуан” (КНР) розроблено 6-ти компонентний евтектичний сплав для модернізації вузла космічної техніки та технологію виготовлення виробів з нього (рис. 12). Замість вказаних у технічному завданні $\rho < 7$ г/см³; $\sigma_{02} \geq 500$ МПа при 1000 °С отримано сплав з $\rho = 6,35$ г/см³; $\sigma_{02} = 860$ МПа при 1000 °С.



Рис. 12. Деталь газового приводу крила ракет з 6-ти компонентного евтектичного сплаву.

Для КБ «Південне» розроблено та передано замовнику:

- Однофазний 5-ти елементний прокатаний сплав для застосування в якості мембрани для передачі руху між ізольованими камерами з різницею тиску до 20 атм. при температурі до 1000 °С (розробка для впровадження у КНР).

- Розроблено жароміцний і жаростійкий сплав та виготовлено конструкцію з нього, яка пройшла стендові випробування при температурі 1200 °С (робота проводилася в рамках створення жаростійких конструкцій космічного човника в рамках європейської програми Горизонт 2020).

Для ДП «Івченко-Прогрес» розроблено та передано замовнику

- Ливарний сплав для робочих та соплових лопаток газотурбінного двигуна з довготривалою міцністю 140 МПа впродовж 40 годин при 1200 °С.

- Сплав, що деформується, для корпусних виробів з міцністю не менше 60 МПа при 1250 °С.

- Спільно з АТ «ТіТехнолоджи» розроблена технологія аргонно-дугової виплавки промислових заготовок для литва робочих та соплових лопаток газотурбінного двигуна ДП «Івченко-Прогрес».

- Технологія нанесення надтвердих покриттів (TiVZrNbHfTa)N на сталі Р6М5К5МП та Р18 передана для використання державному підприємству ХМЗ «ФЕД». Встановлено збільшення працездатності в 4-5 разів інструменту з нанесеним надтвердим покриттям при нарізанні зубців шестерен із загартованої сталі (рис. 13).



Рис. 13. Довб'яки зі швидкоріжучої сталі Р6М5К5МП та Р18 з нанесеним надтвердим покриттям (TiVZrNbHfTa)N.

- В межах партнерського проекту УНТЦ Р427 на загальну суму 85 000 \$ розроблено та передано корпорації Боїнг сплав системи TiNiHfNb з оборотною високотемпературною пам'яттю форми у 2% при температурах вищих за 150°С.

- В рамках контрактів з LG ELECTRONICS INC виконані роботи з комп'ютерного дизайну та виплавки матеріалів високоентропійних сплавів з низькою вартістю для заміни нержавіючої сталі та алюмінієвих сплавів на загальну суму 45 000 \$.

- Підписано протокол наміру з **Пекінським інститутом авіаційних матеріалів** стосовно проектування та дослідження складу жароміцних високоентропійних сплавів, їх структури та властивостей на загальну суму 490 000 \$.

Підсумок.

Представлений цикл робіт узагальнює принципово важливі наукові та методологічні досягнення отримані авторами на новому для світового матеріалознавства напрямку, пов'язаному із розробкою нового класу полікомпонентних (у тому числі високоентропійних) матеріалів і практично важливі результати, що вже використовуються вітчизняними підприємствами високотехнологічного спрямування. Розробки спрямовані як на підвищення якісних характеристик та конкурентоспроможності вітчизняної продукції, так і на вирішення проблем критичного імпортозаміщення вкрай важливого для України. Публікації авторів добре відомі вітчизняній та світовій науковій спільноті.

Кількість публікацій: 234, в т.ч. 6 монографій, 1 підручник, 227 статей (177 – у англомовних журналах з імпаکت-фактором). Загальна кількість посилань на публікації авторів/ h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – 1947/20, Scopus– 2225/22, Google Scholar – 3958/30. За даною тематикою захищено 3 докторських та 7 кандидатських дисертацій.

Претенденти:

В. Ф. Горбань

Г.С. Фірстов

А.О. Андрєєв

М.В.Карпець

М.О. Крапивка

Т.Г. Рогуль

О.Д. Табачнікова

М.П. Бродніковський

