

ДОВІДКА ПРО ТВОРЧИЙ ВНЕСОК
доктора технічних наук, провідного наукового співробітника інституту
проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук
України Горбаня Віктора Федоровича в наукову роботу за темою
**«Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з
унікальними фізико-механічними властивостями»**

Особистий внесок В.Ф. Горбаня при створенні полікомпонентних матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями відносяться:

Розробка наукової методології швидкої та ефективної оцінки властивостей металів, сплавів та покріттів за допомогою автоматичного індентування. На підставі встановленого рівняння індентування вперше запропоновано визначати структурний стан матеріалів та покріттів за допомогою співвідношення твердість-приведений модуль пружності (H/E_r) а також оцінювати межу міцності при індентуванні.

Встановлення впливу електронної структури, розміру атомів, ентальпії змішування, на фазовий склад, параметри гратки, дисторсії та властивості полікомпонентних сплавів з високим рівнем ентропії.

Отримання та встановлення властивостей нових полікомпонентних сполук на основі високоентропійних твердих розчинів та фаз Лавеса, σ - і μ -фаз.

Наукові основи створення жароміцьких сплавів на основі високоентропійних сплавів та природних композитів на їх основі

Розробку та визначення фізико-механічних та технологічних властивостей металевих, нітридних, карбідних і оксидних полікомпонентних покріттів з високою ентропією.

Високий рівень результатів по розробці багатоелементних жароміцьких, сплавів та покріттів на їх основі стало основою застосування їх у користувачів.

Горбань В.Ф.. має по цій тематиці 1 монографію, 76 публікацій в наукових журналах і 40 виступів на наукових конференціях. Загальна кількість цитувань Горбань В.Ф. у БД Scopus 158- (індекс Гірша $h=8$), WoS – 353 (індекс Гірша $h=10$), Google Scholar – 1004 (індекс Гірша $h=17$).

Претендент на здобуття
Державної премії України

В.Ф. Горбань

Директор інституту
академік НАН України

Ю.М. Солонін



ДОВІДКА ПРО ТВОРЧИЙ ВНЕСОК

заступника директора з наукової роботи

Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,

доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника

Фірстова Георгія Сергійовича в наукову роботу за темою

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

Особистий внесок Г. С. Фірстова полягає в закладенні наукових зasad створення високотемпературних сплавів з пам'яттю форми. Найбільш важливі результати було одержано на двох групах матеріалів: 1) бінарних інтерметалідах і 2) полікомпонентних інтерметалідах, що складаються із трьох-, шістьох і більше компонентів.

Стосовно першої групи матеріалів слід зазначити наступне.

- 1) Одержано феноменологічне рівняння, яке уможливлює розрахувати температури мартенситних перетворень з урахуванням особливостей електронної будови та кристалічної структури. Встановлені закономірності були підтвердженні експериментально; вони уможливлюють цілеспрямовано конструювати матеріали з високотемпературним ефектом пам'яті форми (ЕПФ), зокрема до температури у 700 К. До розробок автора ефект пам'яті форми в основному досліджувався в інтервалі температур нижче 390 К.
- 2) Поєднання результатів першопринципних розрахунків і структурного аналізу з використанням методу Рітвельда дало змогу показати на прикладі типу *B2* бінарних еквіатомних інтерметалевих сполуках Zr, що структуроутворення в процесі мартенситного перетворення, зокрема за підвищених температур, визначається пониженням симетрії типу *B2* аустенітної фази, що відповідає пониженню повної енергії кристалу, а причиною структурної нестабільності й утворення двох мартенситних фаз є виникнення у них двох типів локального близького порядку, що визначаються взаємодіями Zr-Me та Me-Me (де Me — Co, Ni, Cu), які конкурують.
- 3) Встановлено, що зростання температур мартенситного перетворення у високотемпературних сплавах з ефектом пам'яті форми, — типу *B2* еквіатомних інтерметалевих сполуках Zr, — забезпечується переважанням взаємодії Me-Me на фоні послаблення 3d-4d-гібридизації електронних станів мало- та багатоелектронних атомів і підкріплюється меншою, порівняно з аустенітом, щільністю паковання мартенситних структур, що при нагріванні додатково стабілізує мартенситні фази завдяки вібраційній складової ентропії.
- 4) Вперше одержано сплави з високотемпературним і надвисокотемпературним ЕПФ. Так, для трикомпонентних сплавів на основі TiNi із вмістом Zr або Hf та багатокомпонентних сполук на основі ZrCu із додаванням Ni, Co та Ti, на яких продемонстровано відновлення форми у 2–5% в інтервалі температур від 400 до 700 К. Надвисокотемпературний ЕПФ одержано на бінарному інтерметаліді HfIr (1% оберненої деформації при 1200 К). Втім,

для розроблених сплавів не вдалося мінімізувати функціональну втому, яку зумовлено дислокаційними процесами.

Та такі негативні явища вдалося подолати переходом до другої групи матеріалів полікомпонентних високоентропійних сплавів.

1. Вперше встановлено, що наявність дисторсій кристалічної ґратки, притаманних полікомпонентним сплавам, істотно обмежує прояв дислокаційної непружності, але водночас практично не заважає власне мартенситному перетворенню.
2. Цілеспрямовано було одержано мартенситне перетворення у багатокомпонентній інтерметалевій сполуці, близькій до еквіатомного складу $TiZrHfCoNiCu$ з високою ентропією змішання (до $14,897 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), яке супроводжувалося стабільною пам'яттю форми у 2–3% оберненої деформації в широкому температурному інтервалі 77–900 К. Схожу поведінку було продемонстровано на сполуці $CoNiCuAlGaIn$, що засвідчило встановлення важливих закономірностей для інженерії багатокомпонентних інтерметалевих сполук, які зазнають мартенситного перетворення.
3. Застосування багатоелементного підходу до створення новітніх матеріалів з пам'яттю форми уможливило позбутися пластичних ефектів функціональної втому завдяки зростанню межі плинності удвічі (до 1200–1700 МПа) порівняно з такими промисловими аналогами як нітінол. Природу такого змінення було пов'язано з триклинними викривленнями ОЦК-ґратки високотемпературної фази, впорядкованої за типом $B2$, які, у свою чергу, є результатом специфічної міжатомної взаємодії. Одержані результати дали змогу запропонувати світовій спільноті новий клас функціональних матеріалів — високоентропійні сплави з пам'яттю форми. (Саме такою назвою вони позначаються у сучасній науковій літературі.)

За темою роботи Г. С. Фірстов має 42 публікації (в тому числі 2 монографії) із загальним числом цитувань за БД: Scopus — 1042 (індекс Гірша $h = 12$), WoS — 1049 (індекс Гірша $h = 12$), Google Scholar — 1462 (індекс Гірша $h = 13$). Загальна ж кількість цитувань праць Г. С. Фірстова за БД Scopus дорівнює 1063 (індекс Гірша $h = 12$), WoS — 1069 (індекс Гірша $h = 13$), Google Scholar — 1514 (індекс Гірша $h = 14$).

Внесок доктора фізики-математичних наук, старшого наукового співробітника Г. С. Фірстова у виконання наукової роботи за темою «Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями» складає 12%.



Претендент на здобуття
Державної премії України
в галузі науки і техніки

В. А. Татаренко

Г. С. Фірстов

ДОВІДКА ПРО ТВОРЧИЙ ВНЕСОК
проводного наукового співробітника Національного наукового центру
«Харківський науково-технічний інститут», старшого наукового
співробітника, доктора технічних наук
Андреєва Анатолія Опанасовича в наукову роботу за темою
**«Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з
унікальними фізико-механічними властивостями»**

Особистий внесок А.О. Андреєва полягає в розробленні наукових основ інженерії наноструктурних високоентропійних покриттів. Під його керівництвом і безпосередній участі вперше отримані вакуумно-дуговим методом і методом розпилення у плазмі вакуумного (стиснутого) газового розряду покриття на основі нітридів, карбідів і оксидів високоентропійних сплавів.

Вперше встановлено, що отримані вакуумно-дуговим методом нітриди високоентропійних покриттів мають максимальну твердість до 64 - 68 ГПа, а отриманих в плазмі дугового газового розряду 40...52 ГПа.

Вперше встановлено, що для вакуумно-дугових покриттів основною відмінною рисою високоентропійних матеріалів і нітридів на їх основі в порівнянні з монометалічними матеріалами і нітридами на їх основі є менший середній розмір кристалітів при аналогічних умовах отримання. Це призводить до того, що для високоентропійних покриттях розмір нанозерен досягає надмалої величини 2... 5 нм, що позначається на збільшенні викривлення кристалічної решітки і покращує фізико-механічні характеристики і термостабільність таких покриттів.

Відмінною рисою високоентропійних нітрідних покриттів порівняно з іншими надтвердими покриттями є їх збільшена ударна міцність. Наприклад, їх нанесення на довб'яки зі сталі Р6М5 при нарізанні зубців шестерен із загартованої сталі збільшило їх працездатність до 4 – 5 разів, чого не було досягнуто при використанні інших надтвердих покриттів (TiZrN, TiCrN) з такою ж твердістю.

Відпал зразків при температурі 1000°C і 1100°C не змінює їх фазового стану. Додаткове азотування нітрідних високоентропійних покриттів збільшує їх твердість, наприклад (TiVZrNbHf)N, від 65 до 83 ГПа.

Для збільшення твердості таких покриттів вперше була використана технологія осадження з іонною імплантациєю за рахунок подачі на підкладки з покриттями імпульсів від'ємного потенціалу амплітудою 800...2000 В, тривалістю 4...16 мкс. з частотою 7кГц. Така технологія забезпечила твердість покриттів до 70 ГПа в діапазоні температур підкладки від 100°C до 500 °C, що дало можливість нанесення покриттів на стальні вироби зі сталей з низькими температурами відпуску.

Вперше встановлена можливість збільшення механічних характеристик нітриду високоентропійного сплаву HfTaTiZrNbV під дією високоенергетичного корпускулярного опромінення. У порівнянні з мононітридними покриттями для яких модельне опромінення Ar+ з енергією

1.8 MeВ до дози 10^{16} іон/см² призводить до падіння твердості на 14 -25%, опромінення (HfTaTiZrNbV)N покриттів супроводжується зростанням твердості на 5 - 7% до 42 ГПа при зменшенні розміру кристалітів до 50 нм.

Для нанесення наношарових покриттів була модернізована вакуумно-дугова установка «Булат-6». Це дозволило вперше отримати і дослідити багатошаровіnanoструктурні покриття на основі (TiZrNbTaHf)N та (TiZrNbHf)N наношарів та наношарів нитридів перехідних металів та одержати композит (TiZrNbHf)N/Mo₂N з унікальним поєднанням властивостей: достатньо високою твердістю до 53 ГПа при досить високій пластичності і низькому (0,36 – 0,43) коефіцієнті тертя.

Вперше отримані і досліджені фізико-механічні властивості карбідів, отриманих іонним розпиленням високоентропійного сплаву TiZrHfVNbTa і AlCrFeCoNiCuV в плазмі стисненого газового вакуумно-дугового розряду суміші аргону і ацетилену. Встановлено, що твердість високоентропійного карбіду досягає 43-48 ГПа і порівняна з твердістю карбіду вольфраму. Коефіцієнт тертя для карбідного високоентропійного покриття на основі сплаву TiZrHfVNbTa в діапазоні навантажень від 2,2 до 5,5 Н змінюється від 0,14 до 0,16.

Для використання при високих робочих температурах вперше отримано і досліджено фізико-механічні властивості і термостабільність оксидів високоентропійного сплаву CrFeCoNiMn, отриманого розпиленням в плазмі стиснутого вакуумно-дугового розряду. Визначено, що в оптимальній пропорції кисню і аргону (30 – 50 % O₂) твердість покриття знаходиться в області 23-27 ГПа. З'ясовано, що при відпалі високоентропійної оксидної фази в покритті при температурі 1373 К на повітрі протягом 300 хвилин твердість покриттів знижується з 24 до 17 ГПа. Коефіцієнт тертя досягає значень 0,05 в оптимальному стані

Таким чином, вперше отримані і досліджені покриття на основі високоентропійних сплавів і їх з'єднань з азотом, вуглецем та киснем, які показали унікальні фізико-технічні властивості і можуть бути використані в промисловості для збільшення працездатності інструментів і деталей машин.

За темою роботи Андреєв А.О. має 33 видання із загальним числом цитувань у БД Scopus - 264 (індекс Гірша h=8), WoS – 203 (індекс Гірша h=7), Google Scholar – 667 (індекс Гірша h= 12).

Внесок Андреєва А. О. у виконання наукової роботи за темою «Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями» складає 13%.

Претендент на здобуття
Державної премії України

А.О. Андреєв

Підпис А.О. Андреєва засвідчує:
Учений секретар ХФТІ НАН України,
к.ф-м.н.

О.В. Волобуев



ДОВІДКА ПРО ТВОРЧИЙ ВНЕСОК

провідного наукового співробітника Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, доктора фізико-математичних наук,

Карпця Мирослава Васильовича в наукову роботу за темою
«Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями»

Особистий внесок М.В. Карпця полягає в організації проведення кристалоструктурних досліджень матеріалів з високою конфігураційною ентропією для встановлення їх структурного стану та формування науково обґрунтованих рекомендацій з метою створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями на основі полікомпонентних сплавів. Оригінальністю вказаних досліджень є дифрактометричне '*in-situ*' вивчення сплавів в режимі реального часу при температурах 293–1473 К та обробкою одержаних даних методом повнопрофільного аналізу (метод Рітвельда).

Вперше, на основі проведених досліджень розроблено ВЕС FeCoCrNi₂MnCu, що має високі показники пластичності та здатен деформуватися прокаткою при кімнатній температурі на 98 %. Досліджено його фазовий склад, мікроструктуру та фізико-механічні властивості на усіх етапах деформування.

Показано, що при холодній прокатці ВЕСу FeCoCrNi₂MnCu, подібно до чистих металів та сплавів зі структурою ГЦК, виникає текстура прокатки з основною компонентою {110} <112>, рівень мікротвердості деформованого на 98 % сплаву зберігається до температури відпалу 1273 К (0,84 T_{плавл}), а стан близький до наноструктурного до 1073 К (0,7 T_{плавл}).

Вперше, методом високотемпературної *in situ* рентгенівської дифракції, проведено дослідження фазових перетворень в литому високоентропійному сплаві FeCoCrNiVAL в інтервалі температур 293–1273 К. У вихідному стані сплав – однофазний твердий розчин на основі ОЦК структури, впорядкованої по типу B2. Встановлено, що при температурі 1073 К на поверхні сплаву та в його об’ємі по границям зерен формується тетрагональна σ-фаза типу CrFe.

Вперше досліджено композиційні, зносостійкі ВЕСи FeCoCrNi_xMnV ($0 \leq x \leq 2$) змінені частинками інтерметалічної σ-фази. Показано, що у вивчених сплавах σ-фаза присутня не у вигляді бінарного чи потрійного інтерметаліду, а утворює невпорядкований твердий розчин заміщення всіх наявних у сплаві елементів.

Вперше, методом високотемпературної дифрактометрії досліджено фізико-хімічні закономірності утворення фаз типу α- і β-Mn (χ і π , відповідно) в метастабільному та стабільному станах в системі на основі феруму Fe–Mo–Cr–C. Виявлено особливості перебігу фазових перетворень за участю χ - і π - фаз, встановлено вплив легування карбоном та хромом на стабільність Mn-подібних структур. З отриманих результатів випливає, що в трикомпонентній металічній системі Fe–Mo–Cr фаза зі структурою типу β-Mn може бути

стабілізована певним зовнішнім впливом, наприклад шляхом надшвидкого гартування вихідного розплаву.

Вперше, в системі Al-Ti-Cr, методом високотемпературної рентгенографії при температурах вище 1273 К встановлено існування широкої області складів сплавів, в яких реалізується двофазний стан на основі упорядкованої кубічної структури L1₂ та фази з кубічною граткою β (твердий розчин Ti і Al в ОЦК гратці Cr). В результаті фазових перетворень в твердому стані з β -тврдого розчину можуть виділятися інтерметаліди AlCr₂ або Ti(AlCr)₂ (фаза Лавеса тип C14).

Вперше, методом високотемпературної дифрактометрії в інтервалі температур 293 - 473 К виявлено нову орторомбічну фазу та зворотне мартенситне перетворення в нестехіометричному інтерметаліді складу Ti_{75,5}Sn_{24,5}: за кімнатної температури літий інтерметалід має орторомбічну структуру (прототип NaHg), яка при нагріванні до 473 К перетворюється в гексагональну D0₁₉ згідно встановленого орієнтаційного співвідношення (110)_{ortho}||(100)_{hex}, <001>_{ortho}||<001>_{hex}.

Вперше у системі Fe-Co-Cr-Ni-Cu-Al систематично вивчено фазовий склад, структуру та фізико-механічні характеристики ВЕСів. Показано, що тип твердого розчину в сплавах системи Fe-Co-Cr-Ni-Cu-Al визначається середньою електронною концентрацією сплаву. Встановлено елементистабілізатори твердих розчинів на основі фаз з ОЦК (Al, Cr) та ГЦК (Cu, Ni, Co) структурами.

Карпець М.В. систематично проводить роботу по залученню та підготовці молоді до наукової діяльності, в рамках даного наукового напрямку підготував двох кандидатів наук, є науковим керівником аспіранта, займається викладацькою діяльністю в Національному Технічному Університеті України ім. Ігоря Сікорського "Київський політехнічний інститут".

За темою роботи Карпець М.В має 37 робіт із загальним числом цитувань у БД Scopus - 560 (індекс Гірша h=13), WoS – 476 (індекс Гірша h=11), Google Scholar – 864 (індекс Гірша h=16).

Претендент на здобуття
Державної премії України

Карпець М.В.

Директор ПМ НАНУ

Солонін Ю.М.



ДОВІДКА ПРО ТВОРЧИЙ ВНЕСОК

проводного наукового співробітника Інституту проблем матеріалознавства ім.

І.М. Францевича НАН України, кандидата фізико-математичних наук

Крапівки Миколи Олександровича в наукову роботу за темою

«Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з

унікальними фізико-механічними властивостями»

Особистий внесок М.О. Крапивки полягає в розробці наукових підходів до створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями на основі полікомпонентних сплавів з високою ентропією.

Вперше визначено вплив електронної структури на межі існування твердих розчинів полікомпонентних матеріалів з ГПУ, ОЦК, ГЦК та ОЦК-ГЦК гратками.

Визначені області співіснування високоентропійних твердих розчинів та інтермералідних фаз Лавеса, σ -фаз та μ -фаз, а також умови які необхідні для отримання 100 % високоентропійних інтерметалідних фаз.

Вперше створені композиційні матеріали на основі полікомпонентних сплавів з високою ентропією та оксидного волокна. За рахунок великої різномірності атомів матриці міжфазні кордони між волокнами і шарами мають низьку енергію і хорошу адгезію. Розроблений склад та отримано композиційний матеріал «ВЕС-оксидне волокно» має високі характеристики міцності при 1200C.

Вперше визначено, що при середніх температурах, коли внесок ентропійного фактору зменшується, а дифузійна рухливість ще висока, відбуваються фазові перебудови що призводять до появи більш нізкоентропійних фаз (інтерметалідів), ніж твердий розчин (наприклад фаз Лавеса, σ -фаз та інші). Фази які утворюються більш високоміцні та зносостійкі, що призводить до покращення працездатності матеріалу.

Вперше отримані литі полікомпонентні карбіди з високою ентропією що володіють твердістю вище ніж існуючі монокарбіди.

Розроблені наукові основи створення жароміцних сплавів на основі високоентропійних сплавів та природних композитів на їх основі лягли в основу розробки багатоелементних жароміцних, жаростійких сплавів з низькою щільністю. Це забезпечило їх виготовлення та застосування в ряді кінцевих користувачів.

Крапівка М.О. має по цій тематиці, 33 публікацій в наукових журналах і 30 виступів на наукових конференціях. Загальна кількість цитувань Крапівки М.О. у БД Scopus 54- (індекс Гірша $h=3$), WoS – 152 (індекс Гірша $h=7$), Google Scholar – 485 (індекс Гірша $h=10$).

Претендент на здобуття
Державної премії України

М.О. Крапивка

Директор інституту
академік НАН України

Ю.М. Солонін



ДОВІДКА ПРО ТВОРЧИЙ ВНЕСОК

провідного наукового співробітника Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, кандидата фізико-математичних наук

Рогуль Тамари Григорівни в наукову роботу за темою
«Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями»

Особистий внесок Т.Г. Рогуль полягає в розробці наукових підходів до створення матеріалів з гранично досяжним рівнем зміщення.

Вперше введено уявлення про «теоретичну» твердість (граниче високу твердість) та встановлено, що в залежності від атомного механізму непружної поведінки кристалів із різним типом міжатомного зв'язку рівень максимальної досяжної твердості може коливатися від 1/5 до 1/30 модуля пружності. У роботах сформульовано нові методичні підходи для швидкої та ефективної оцінки максимально можливого зміщення матеріалів з урахуванням новітніх можливостей автоматичного індентування, наноіндентування.

Вперше запропоновано узагальнене рівняння типу Холла-Петча для опису залежності критичного спротиву зсуву від розміру структурних елементів, яке описує невідомі раніше особливості зміщення при переході від мікро- до наноструктурованого стану. На основі концепції «корисних домішок» сформульовано принципово нові підходи до інженерії меж поділу матеріалів, спрямовані на досягнення максимально високої міцності (твердості) матеріалу. Отримано експериментальні підтвердження досягнення «теоретичної» міцності.

Показано, що специфіка твердорозчинного зміщення ВЕС полягає як у підсиленні температурної залежності термічної компоненти критичного напруження зсуву, так і в аномально високому атермічному зміщенні. Вперше встановлено, що високе атермічне твердорозчинне зміщення полікомпонентних твердих розчинів спричинене підвищеннем спротиву руху дислокацій завдяки наявності нормальної до площини зсуву компоненти вектора Бюргерса, обумовленої пікорівневими дисторсіями кристалічної гратки. Запропоновано відносно простий вираз для оцінки твердорозчинного зміщення полікомпонентних твердих розчинів $\Delta H(\Delta\sigma)$, який включає емпіричне («середнє») значення модуля зсуву та «середній» параметр розмірної невідповідності (однієї з характеристик дисторсії кристалічної гратки), що може регулюватися складом матеріалу.

Для полікристалічних матеріалів встановлено, що у багатокомпонентних матеріалах «заліковування слабких місць» меж зерен здатне спричинити ефективне підвищення спротиву меж поділу пластичній деформації (ефект зернограницевого зміщення може вдвічі перевищувати внутрішньозеренне зміщення).

Встановлені можливі механізми існування плато на температурній залежності напруження зсуву $\tau(T)$ в інтервалі температур (0,2-0,4)Тпл для

11

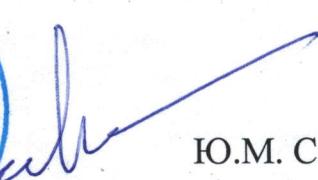
чистих металів та бінарних і багатокомпонентних твердих розчинів. Наявність такого плато є аномальним, оскільки в зазначеному інтервалі температур має місце помітне зменшення модуля Юнга, що повинно призводити до деякого зниження критичного напруження зсуву. Показано, що у випадку чистих металів утворення плато пов'язане зі зростанням середніх квадратичних зміщень атомів і є наслідком збільшення динамічних спотворень кристалічної гратки з підвищенням температури. У бінарних і багатокомпонентних твердих розчинах, окрім збільшення середніх квадратичних зміщень атомів, ефекти, подібні динамічному деформаційному старінню, також можуть впливати на залежність $\tau(T)$ від температури в області, де спостерігається плато. Отримані результати свідчать про можливість створення нового покоління жароміцьких матеріалів.

За темою роботи Рогуль Т.Г. має 19 робіт із загальним числом цитувань у БД Scopus – 28 (індекс Гірша $h=3$), WoS – 72 (індекс Гірша $h=5$), Google Scholar – 167 (індекс Гірша $h=8$).

Претендент

Т.Г. Рогуль

Директор Інституту
проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України
академік НАН України



Ю.М. Солонін

ДОВІДКА

про творчий внесок старшого наукового співробітника Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук

України, кандидата фізико-математичних наук

Табачнікової Олени Дмитрівни у наукову роботу

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

яка висувається для участі у конкурсі зі здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2020 року

О.Д. Табачнікова є відомим фахівцем в галузі досліджень механічних властивостей металевих матеріалів при низьких температурах. Особистий внесок О.Д. Табачнікової полягає в отриманні нових експериментальних результатів щодо широкого класу полікомпонентних (багатоелементних) металевих матеріалів, таких як металеві стекла та високоентропійні (ВЕС) сплави, в інтервалі середніх та наднизьких температур (300- 0,5К). О.Д. Табачніковою були виявлені та досліджені фізичні механізми пластичної деформації та руйнування цих матеріалів. Такі дослідження в області наднизьких температур не мають аналогів у світі та носять пionерський характер.

У рамках теми роботи О.Д. Табачніковою було зроблено наступне:

1. Для металевих аморфних сплавів проведено експериментальні дослідження низькотемпературних механічних властивостей та руйнування багатоелементних аморфних металевих сплавів (АМС), таких як $Ni_{78}Si_8B_{14}$, $Fe_{70}Ni_{10}B_{20}$, $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$, $Zr_{46,8}Ti_8Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ та інших, як у вигляді стрічок, так і у вигляді об'ємних матеріалів.

Для кріогенних температур вперше визначено:

— унікально високі значення міцності (до ~ 3 Гпа для АМС $Fe_{81}Si_{14}B_{13}C$) та в'язкості руйнування K_{Ic} (~ 69,3 МПа/м^{1/2} для АМС $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ та

$Zr_{46,8}Ti_8Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$) при наявності високої локальної пластичності у стрічках АМС та пластичності на рівні 10% для об'ємних сплавів.

- встановлено збереження в'язкого характеру руйнування при зниженні температури від 300 до 0,5 К.
- встановлено гетерогенний характер пластичної деформації та швидкість руйнування смуги катастрофічного зсуву, яка дорівнює значення $\sim 10^3$ м./сек.
- експериментально встановлено нове явище - значний локальний розігрів (аж до температури плавлення) матеріалу в смузі катастрофічного зсуву в ході руйнування АМС в широкій області температур від 300 до 0,5 К.
- встановлено, що стрибкоподібна деформація, яка спостерігається при одноосьовому стисненні у сплаві $Zr_{46,8}Ti_8Cu_{7,5}Ni_{10}Be_{27,5}$ при 300 К, обумовлена неоднорідним характером пластичної деформації шляхом утворення і поширення локалізованих смуг зсуву. Показано, що цей процес добре узгоджується з полікластерною моделлю аморфних твердих тіл.

2. Для полікомпонентних високоентропійних сплавів (ВЕС) в інтервалі середніх та наднизьких температур (300-0,5 К) О.Д. Табачніковою було досліджено механічні властивості широкого класу еквіатомних та нееквіатомних ВЕС з ГЦК та ОЦК гратками в залежності від початкової мікроструктури: від середнього розміру зерен (крупнозернистий або наноструктурний стані), від фазового складу, відпалу, тощо, та було проведено теоретичний аналіз цих даних.

О.Д. Табачніковою встановлено наступне:

- вперше для нееквіатомних ВЕС $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ (TWIP), $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ (TRIP) та $Co_{17,5}Cr_{12,5}Fe_{55}Ni_{10}Mo_5$ у крупнозернистому стані в ході активної деформації одноосьовим розтягненням для інтервалу температур 300- 4,2 К було зареєстровано рекордне співвідношення міцності та пластичності (на рівні міцності ~ 1000 МПа та пластичності $\sim 40\text{-}50\%$), що перевищує аналогічну характеристику у відомих кріогенних стальях. Так, для кріогенної сталі 12Х18Н10Т (при 20 К) спостерігаються ідентичні значення

міцності, але удвічі менша пластичність ($\sim 25\%$). Висока пластичність ВЕС в умовах низьких температур обумовлена посиленням процесів двійникування та енергетично вигідних фазових перетворень ГЦК-ГІЦП.

- вперше на прикладі ВЕС системи CoCrFeNiMnV_x ($x=0, 0,25, 0,5, 0,75$) досліджено для широкого інтервалу низьких температур зв'язок мікроструктури з міцністю та пластичністю сплавів. Встановлено, що мікроструктура, яка складається з пластичної ГЦК фази з міцними частками сигма-фази, створеними домішками ванадію, обумовлює високоміцний стан (наприклад, для $x=0,75$ при $4,2 \text{ K}$ досягається міцність $\sim 1,4 \text{ ГПа}$).
- вперше для класичного ВЕС CoCrFeNiMn показано, що перехід від крупнозернистого (з середнім розміром зерен $r \sim 10 \text{ мкм}$) до наноструктурного стану ($r \sim 60 \text{ нм}$) призводить до зміцнення сплаву у наноструктурному стані \sim у 5-6 разів (від $0,6 \text{ ГПа}$ до 3 ГПа при $4,2 \text{ K}$);
- вперше для ряду ВЕС CoCrFeNiMn , $\text{CoCrFeNiMnV}_{0,2}$, $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{26}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{14}$ встановлено нове явище – аномальне зменшення мікротвердості та деформуючої напруги при розтягненні після інтенсивної пластичної деформації крутінням під високим тиском (HPT) при кріогенної температурі (77 K) в порівнянні з подібними характеристиками після HPT при 300 K . За допомогою сучасних методів досліджень (рентгенівської дифракції (XRD), скануючої електронної мікроскопії (SEM) та просвічучої електронної мікроскопії (TEM)) встановлено, що причиною аномалії є низькотемпературні фазові перетворення ГЦК-ГІЦП, ініційовані пластичною деформацією у ході HPT при 77 K . Такі перетворення призводять до змін у мікроструктурі – високої гетерогенності, росту середнього розміру зерен та зменшення середньої щільності дислокацій;
- вперше для ВЕС за допомогою відомого методу термоактиваційного аналізу процесу пластичної деформації було визначено фізичні механізми, що контролюють термоактиваційну пластичність у інтервалі низьких температур. Метод полягає у порівнянні теоретичних та експериментальних залежностей у широкому температурному інтервалі деформуючої напруги, її

швидкісної чутливості та активаційного об'єму пластичної деформації. За допомогою апроксимації теоретичних та експериментальних залежностей знаходяться емпіричні параметри теорії, з аналізу яких визначається найбільш імовірний механізм, який контролює термоактиваційну пластичність.

— Було встановлено, що для ВЕС $Ti_{30}Zr_{25}Hf_{15}Nb_{20}Ta_{10}$, $CrMnFeCoNi_2Cu$ та $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ у температурному інтервалі $\sim (300-20)$ К існує єдиний контролюючий механізм термоактиваційної пластичності, а саме термоактиваційний рух дислокацій через локальні перешкоди. Такі перешкоди складаються з кількох атомів (кластери) з енергією активації $H_0 \approx 0,75$ эВ, розташованих один від одного на відстані $l \sim$ декількох нанометрів. Експериментальні електронно-мікроскопічні дослідження мікроструктури ВЕС $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ підтвердили у мікроструктурі сплаву наявість кластерів такого типу.

У дану роботу увійшли 54 наукові публікації О.Д. Табачнікової у провідних фахових світових виданнях із загальною кількістю посилань на 26.02.2020 р., згідно баз даних: Web of Science – 417 посилання (h-індекс = 11), Scopus - 404 посилання (h-індекс = 1), Google Scholar – 560 посилань (h-індекс = 12).

Таким чином, внесок кандидата фізико-математичних наук Табачнікової Олени Дмитрівни у здійснення роботи «**Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями**» є значним та складає 12%.

Претендент

О.Д. Табачнікова

Заступник директора

ФТІНТ ім. Б.І. Вєркіна НАН України

М.І. Глушук



ДОВІДКА ПРО ТВОРЧИЙ ВНЕСОК

Завідуючого відділом фізики та технології жароміцких матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, кандидата фізико-математичних наук Бродніковського Миколи Павловича
в наукову роботу за темою
«Використання багатоелементного підходу для створення матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями»

Особистий внесок М.П. Бродніковського полягає в **організації проведення дослідних та технологічних робіт** для застосування багатоелементних сплавів для вирішення практичних завдань авіаційної та космічної техніки по створенню жароміцких сплавів з щільністю $7 \text{ г}/\text{см}^3$ та менше для робочих температур до 1200°C .

Їм було показано, що наступним кроком у розвитку сплавів на основі ніобію для зменшення їх щільності та підвищення жаростійкості є перехід до створення багатоелементних сплавів. Новий підхід вирішив проблеми, які виникали при застосуваннях раніше методах твердо розчинного, дисперсійного та композиційного збільшення жароміцності ніобію. Значне зменшення щільності, підвищення жаростійкості, зносостійкості, пластичності та жароміцності **досягнуто** завдяки створенню низькі сплавів на основі **запропонованої** системи Nb-Ti-Al, легованої Cr, Zr, Mo та Si.

Встановлено, що при легуванні сплавів системи Nb-Ti-Al елементами Cr, Zr, Mo та Si можна отримувати як однофазні сплави з ОЦК структурою, так і евтектичні. Зменшення температури плавлення в евтектичних сплавах до 1400°C , з 1850°C в однофазних, дало змогу створити перспективний ливарний сплав, в якому висока жароміцність, до 380 ПРа, зберігається до 1200°C , а вироби можна отримувати з застосуванням звичайних матеріалів для ливарних форм.

Визначено, що крім варіації фазового складу, додатковим свідченням рухомої фазової рівноваги у багатоелементних сплавах на основі системи Nb-Ti-Al, легованих Cr, Zr, Mo та Si є зростання міцності у ~1,5 рази в області температур $800 - 1000^\circ\text{C}$. **Явище було пояснено** порушенням фазової рівноваги у багатоелементній системі у пружному полі дислокаций, які виникають в процесі деформації. При температурі переходу від дислокаційного механізму деформування до дифузійного, коли підвищується рухомість атомів, у полі дислокаций проходять фазові перетворення із створенням стопорів для дислокаций. **Встановлено**, що в залежності від набору та співвідношення компонент положення максимуму на температурній шкалі і величина пiku міцності можуть бути залежними, або ні, від швидкості деформування. Це, з одного боку, свідчить про різноманітність процесів перетворень, а з іншого – відкриває великі можливості підвищення жароміцності багатоелементних сплавів шляхом впливу на температурний інтервал стабільності фаз зміною легування.

17

Важливим результатом роботи є **досягнуте підвищення жаростійкості ніобію на два порядку завдяки легування його Cr, Al, Ti та Si.**

Для **розвроблених багатоелементних сплавів відпрацьована технологія** лазерного зварювання. **Встановлено** особливості зонної структури зварного шву багатокомпонентних евтектичних сплавів. **Показано**, що завдяки теплофізичним властивостям сплавів ніобію слабке місце зварного шва визначається не стільки зереною структурою, що формується, скільки місцем створення гострого градієнту температур. **Знайдено** оптимальне співвідношення потужності та швидкості руху лазерного променю для зменшення градієнту температур.

Високий рівень отриманих результатів по розробки багатоелементних жароміцьких, жаростійких сплавів з низькою щільністю **забезпечив застосування їх рядом кінцевих користувачів.**

По замовленню КБ “Південне” та Нанкінської корпорації “Чень Гуан” у КНР розроблено 6-ти компонентний евтектичний сплав для модернізації вузла космічної техніки та технологію виготовлення виробів з нього. Замість вказаних у технічному завданні $\rho < 7 \text{ г/см}^3$; $\sigma_{02}^{1000^\circ\text{C}} \geq 500 \text{ Мпа}$ отримано сплав з $\rho = 6,35 \text{ г/см}^3$; $\sigma_{02}^{1000^\circ\text{C}} = 860 \text{ Мпа}$.

Для КБ «Південне» також 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°C (розробка для впровадження у КНР).
- Розроблено жароміцький та жаростійкий сплав та виготовлено конструкцію з нього, яка пройшла стендові випробування при температурі 1200°C

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

М.П. Бродніковський має по цій тематиці, 16 публікацій в наукових журналах . Загальна кількість цитувань у WoS – 4 (індекс Гірша h=1), Google Scholar – 87 (індекс Гірша h=5).

Претендент на здобуття
Державної премії України

Директор інституту
академік НАН України

М.П. Бродніковський

Ю.М. Солонін

