

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Пасічник В.А.



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок
«Розробка нового класу металокерамічних композитів із порошків надтвердої армованої кераміки для екстремальних умов експлуатації»

Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»
Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0108

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок
(реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0108, «Розробка нового класу металокерамічних композитів із порошків надтвердої армованої кераміки для екстремальних умов експлуатації».

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік
Тривалість виконання Проєкту у 2021 році
Початок – 06 травня 2021 року
Закінчення – 15 грудня 2021 року

Загальна вартість Проєкту, грн. 11 243 500 грн. (одиннадцять мільйонів двісті сорок три тисячі п'ятсот гривень 00 копійок).

Вартість Проєкту по роках, грн.:

- 1-й рік 1 500 000,00 млн грн (один мільйон п'ятсот тисяч гривень 00 копійок).
- 2-й рік 4 743 500,00 грн (чотири мільйони сімсот сорок три тисячі п'ятсот гривень 00 копійок).
- 3-й рік 5 000 000 грн (п'ять мільйонів гривень 00 копійок).

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту буде залучено 9 виконавців, з них:

- доктори наук 3;
- кандидати наук 3;
- інші працівники 3.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(І) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Залучення організації(й) субвиконавця(ів) до проєкту не передбачається.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Створення фізико-хімічних основ керування процесами синтезу нового класу високоміцних композиційних матеріалів із порошків армованих тугоплавких сполук (ТС) та високоентропійних сплавів.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

- дослідити сплавоутворення у системах типу ТС – ВЕС;
- встановити термодинамічну, кінетичну та термомеханічну сумісність ТС та ВЕСів;
- дослідити вплив фізико-хімічних параметрів консолідації на кінетику процесів ущільнення,
- встановити механізми зміцнення нових композиційних матеріалів
- дослідити кінетику процесу високотемпературного окиснення композитів;
- вивчити триботехнічні властивості композитів.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)
Найвищі значення твердості та робочі температури (аж до 1600 °С) мають керамічні матеріали, але вони поступаються перед іншими по міцності та ударній в'язкості. Найбільш ВЕС з правильно підібраним складом можуть конкурувати та більш ефективно застосовуватись замість традиційних металевих зв'язок в металокермічному композиті ТС-ВЕС.

- Новизна проєкту (до 400 знаків)
Вперше буде створено фізико-хімічні основи синтезу нового класу композиційних матеріалів із армованих тугоплавких сполук та високоентропійних сплавів, які передбачають використання наноструктурних багатокомпонентних сплавів з заданою структурою в якості зв'язки (на заміну Fe, Co, Ni, Mo та їх сплавів) для покращення спікаємості тугоплавких компонентів, структури та комплексу фізико-хімічних і механічних характеристик спечених композитів.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)
Для отримання металокерамічних композитів було обрано суміші порошків ВЕСів та ТС ((WC-W₂C)+ВЕС; (W₄C-TiB₂)+ВЕС). ВЕСи отримані механічним легуванням. З метою отримання щільних композитів суміші порошків спікались іскро-плазмовим методом. Композиційні покриття отримували холодним газодинамічним напиленням. Скануюча електронна мікроскопія, рентгенофазовий (фазовий склад, напруження), дюрOMETричний аналізи використовувались для досліджень сплавоутворення в системі ВЕС-ТС.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

На прикладі композиційних покриттів на основі високоентропійного AlNiCoFeCr сплаву з твердими керамічними частинками, встановлено вплив тиску та температури потоку стисненого повітря на мікро- та макроструктуру (розмір фазових складових, об'ємний вміст фаз, пористість та однорідність). При збільшенні тиску від 0,8 до 0,9 МПа за однакової температури відбувається додаткове подрібнення на 30% фазових складових високоентропійного сплаву та зменшення пористості покриття у 2 рази за рахунок збільшення деформаційної складової процесу напилення. При цьому, керамічні частинки TiB₂ та WC (намел в процесі механічного легування та змішування) не змінюють свого розміру за рахунок значно вищої твердості, а також об'ємний вміст частинок TiB₂ значно менший від введеного (38,9 об.%) та практично однаковий для обох використовуваних тисків, що свідчить про його малий вплив на вміст тугоплавкої складової в покритті.

Показано, що відпал за температури 1100 °С спечених композитів, за різного часу витримки, дозволяє контролювати дифузійні процеси, які протікають в системі, що дозволяє отримати композиційні матеріали із заданими параметрами структури та властивостей. При ущільненні системи (W₄C-TiB₂)-AlCoCrNiFeTi встановлено кінетику процесу формування

перехідної зони. Показано, що збільшення часу витримки при температурі 1300 °С з 0 до 20 хв веде до збільшення зони (з 14 до 80 мкм) взаємодії за рахунок появи рідинної фази та інтенсивної реакційної взаємодії. Показано, що в таких умовах відбувається формування армованої структури перехідної зони.

На основі аналізу характеру взаємодії складових W_4C-TiB_2 та $AlCoCrNiFeTi$ композиту зроблено висновок про можливі механізми ущільнення порошкових сумішей відповідних складових, який полягає в присутності кількох механізмів, а саме твердофазної взаємодії на початкових етапах ущільнення (дифузійний механізм) та ущільнення в присутності рідкої фази за рахунок перегрупування частинок ТС, а також перекристалізацію через рідинну фазу.

Встановлено умови формування композиційного матеріалу з мінімальними внутрішніми напруженнями шляхом дослідження впливу природи матеріалу ($WC-W_2C/W_4C-TiB_2-BEC$), технологічних параметрів процесу ущільнення (температури, швидкість охолодження) та холодного газодинамічного напилення на напружено-деформований стан. Встановлено вплив параметрів холодного газодинамічного напилення на фазовий склад, мікро-, макроструктуру та мікромеханічні властивості композиційних покриттів зі сплавів системи ТС – ВЕС. Досліджено коефіцієнти термічного розширення фазових складових $BECu - 12,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ та $WC-W_2C - 9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ та $W_4C-TiB_2 - 8,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Встановлено, що збільшення швидкості охолодження з 100 °С/хв до 400 °С/хв композитів призводить до збільшення величини стискаючих напружень в композитах $AlCoCrFeNiTi - WC-W_2C/W_4C-TiB_2$.

Встановлено наступні механізми ущільнення композиційних покриттів на основі високоентропійного $AlNiCoFeCr$ сплаву з тугоплавкими сполуками типу TiB_2 , W_4C-TiB_2 та ін.:

1) деформаційний механізм (основний). Надзвичайно великі значення деформації більш м'якої матриці з високоентропійного $AlNiCoFeCr$ сплаву під дією надзвукових швидкостей (досягає за порядком величини $10^7-10^5 s^{-1}$) забезпечує високу щільність за рахунок міцного, щільного контакту між частинками, що за рахунок деформації утворюють шари приблизно однакової товщини, вдавлюючись в порожнини між собою.

2) Ударний механізм (додатковий) – за рахунок твердих частинок тугоплавкої сполуки. Удар твердих частинок на надзвичайно високій надзвуковій швидкості (500...1000 м/с), при досить низькій температурі обробки (в 5 і більше разів менше температури плавлення тугоплавких сполук), призводить до їх вдавлювання в м'якішу металеву матрицю, сприяючи більшій деформації та, відповідно, сприяє зменшенню порожнин між частинками, а також тверді частинки частково виступають в якості абразивного матеріалу, що активує поверхню, на яку відбувається напилення, видаляючи оксидні шари, забруднення та домішки, збільшуючи ущільнення за рахунок рівномірного контакту між частинками. Більш того, тверді частинки створюють мікророзмірні виступи, які сприяють зчепленню порошкових частинок і збільшують площу контакту покриття з основою та попередньо напиленими шарами.

З використанням рентгеноструктурного аналізу було визначено величини макро- і мікронапружень, що виникають у фазових складових композиційних матеріалів під час холодного газодинамічного напилення покриттів. Встановлено, що зі збільшенням температури напилення від 200 °С до 450 °С залишкові мікронапруження збільшуються за рахунок ударної взаємодії частинок з основою та попередньо напиленими шарами. Мікронапруження фазових складових ВЕС (ОЦК та ГЦК твердих розчинів) і TiB_2 (W_4C) також зростають в зв'язку з подрібненням пластичної складової композитів. Після термічної обробки макро- та мікронапруження зменшуються у 1,5-2 рази у всіх складових композитів, проте залишається залежність їх величини від температури процесу ХГН, що може бути пов'язано з дислокаційними дефектами, які утворились в покриттях.

По результатам виконання етапу підготовлено: звіт за етап, до друку 2 статті, 4 магістерські дисертації (Єфіменко М.Ю., Літвінова О.А., Лань Цзиньлун, Шао Їжу). Результати роботи опубліковані: на міжнародній конференції HighMatTech 2021 (9 тез доповідей); в журналі з кватилем Q2 (1 стаття)

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Середнє значення твердості отриманих нових композиційних матеріалів ($WC-W_2C$) – HEA досягає 93 HRA ($HV = 17-20$ ГПа), що значно вище, ніж у традиційних твердих металів $WC-Co$. Крім того, міцність Palmqvist досягала 17 МПа·м^{1/2}, що є на 15-20 % вищим ніж для більшості

твердих сплавів. Середнє значення твердості отриманих нових композиційних матеріалів (V_4C-TiB_2) – HEA досягає ($HV = 25$ ГПа, що значно перевищує твердість традиційних твердих металів $WC-Co$).

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Отримані значення механічних характеристик для нових металокерамічних композитів свідчать про їх перспективність та можливість заміни традиційних твердих сплавів в багатьох областях застосування, що може стати новим етапом революційних змін в технології обробки матеріалів, які протягом останніх 80 років були пов'язані з створенням, виробництвом і застосуванням традиційних твердих сплавів типу ВК, що дозволило на порядок збільшити як стійкість інструменту, так і продуктивність процесів обробки.

Експериментально доведено можливість використання холодного газодинамічного напылення для отримання щільних покриттів з композиційних порошкових матеріалів на основі високоентропійних сплавів та тугоплавких сполук (TiB_2 , V_4C-TiB_2) із повним збереженням фазового складу та наноструктурного стану вихідного порошку. Присутність керамічних частинок у вихідній сировині має ряд переваг, включаючи зміцнення покриття створенням композиційної структури, ущільнення покриття та покращення стабільності процесу напылення.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Отримані результати будуть покладені в основу розробки нових композиційних матеріалів та створення фізико-хімічних основ нового класу надміцних композитів з армованих тугоплавких сполук та високоентропійних сплавів, які будуть запропоновані та передані для реалізації в промисловому виробництві на підприємствах «КБ Південне» ім. М.К. Янгеля», КНВП «ФОРТ» та заводу «Порошкової металургії» м. Бровари на основі укладання господарчих договорів. Більш того новизна, перспективність та інноваційна складова отриманих результатів буде покладена в основу проєктів міжнародних програм НАТО «Наука заради миру» та 9-ої Рамкової програми науково-технічного співробітництва Європейського Союзу «Горизонт Європа» за напрямом 2 «Глобальні виклики та європейська індустріальна конкурентоздатність» (Global Challenges and European Industrial Competitiveness), який включає в себе низку кластерів, що спрямовані на визначені Європейською Комісією галузі діяльності, а саме 4.1 Промислові технології, 4.2 Передові матеріали та 4.6 Нові сприяючі технології.

Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проєкту

Професор, д.т.н.

(посада)

Лобода П.І.

(підпис)

