

Сумський державний університет
04007 Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

ПОГОДЖУЮ
Проректор з наукової роботи

_____ Анатолій ЧОРНОУС

ПРОМІЖНИЙ ЗВІТ
за результатами виконання етапу наукової (науково-технічної) роботи
(звіт про проміжні результати проекту)

«Багатокомпонентні плівкові матеріали: кореляція між електрофізичними і
магніторезистивними властивостями та концентрацією елементів»

Науковий керівник
(головний дослідник) проекту

Сергій ПРОЦЕНКО

Рік завершення, номер етапу 2023, етап № 2

Підготовку звіту завершено 29 грудня 2023 р.

1. Номер державної реєстрації проєкту: №122U000785
2. Номер договору, за яким надається фінансування (за наявності): _____
3. Найменування організації-виконавця проєкту/грантоотримувача: Сумський державний університет
4. Прізвище та ім'я наукового керівника (головного дослідника, principal investigator (PI)) проєкту: Проценко Сергій
5. Місце основної роботи наукового керівника: Сумський державний університет
6. Терміни та тривалість виконання проєкту:
 - Тривалість проєкту 36 місяців
 - Початок 01.01.2022
 - Закінчення 31.12.2024
 - Тривалість звітнього етапу 12 місяців
 - Початок 01.01.2023
 - Закінчення 31.12.2023
7. Обсяги фінансування проєкту:
 - Загальний обсяг фінансування:
 - за запитом (заявкою) 1984,0 тис.грн
 - фактичний 1984,0 тис.грн
 - Обсяг фінансування звітнього етапу:
 - за запитом (заявкою) 650,0 тис.грн
 - фактичний 638,5 тис.грн
8. Перелік виконавців з оплатою праці (ПШБ, посада за основним місцем роботи, посада за проєктом (або договір ЦПХ), окремо зазначаються молоді вчені, студенти, аспіранти (за наявності)) (**Додаток 1**).
9. Стислий зміст проєкту в цілому (актуальність, мета, основні завдання, ідеї, гіпотези тощо) (до 20 рядків)

У теперішній час накопичений значний експериментальний матеріал стосовно фізико- механічних і магнітних властивостей багатокомпонентних металевих покриттів у вигляді високоентропійних сплавів (ВЕС) або їх нітридів. Поряд з цим відсутні літературні дані про вплив концентрації парамагнітних і магнітних компонент на фазоутворення, електрофізичні, магніторезистивні і магнітні властивості плівок. Перша проблема, яку необхідно було вирішити, пов'язана із формуванням фазового складу на основі базової фази без побічних фаз. Сформувавши практично однофазний склад можна провести дослідження фізичних (питомий опір, термічний коефіцієнт опору – ТКО, коефіцієнт тензочутливості – КТ) і магніторезистивних (нормальний магнітоопір – МО, анізотропний магнітоопір – АМО та гігантський магнітоопір – ГМО) властивостей в залежності від концентрації атомів магнітних або парамагнітних компонент. Це забезпечує потенціальні можливості для виготовлення чутливих елементів приладів функціональної електроніки із прогнозованими характеристиками та перспектив застосування ВЕС в аерокосмічній, енергетичній та інструментальній

галузях. Мета проекту полягає у встановленні взаємного зв'язку між величинами питомого опору, ТКО, КТ та ГМО двох класів ВЕС: на основі ОЦК і ГЦП матеріалів та на основі ОЦК, ГЦК і ГЦП металів, та концентраціями атомів окремих компонент і товщиною зразків, що дозволить сформувати термічностійкий однофазний плівковий сплав, розрахувати основні параметри електроперенесення плівкових матеріалів та пояснити механізми розсіювання електронів.

10. Основні результати виконання попереднього (за наявності) етапу (до 20 рядків)

Уперше показано, що в 4-и компонентних плівкових сплавах на основі Cu, Al, Fe Cr, V, Fe і Al та Cr, V, Fe та Ni при відносно великих концентраціях ОЦК (Fe, V, Cr) елементів фіксуються дифракційні відбиття від ОЦК фаз, тобто у межах гомогенного твердого розчину формуються елементи квазіевтектики, що підтверджено методом мікроаналізу ЕДС. На основі результатів експериментальних досліджень термічного коефіцієнту опору – ТКО та теоретичних досліджень коефіцієнту тензочутливості – КТ вперше встановлено, що ТКО в інтервалі товщин від 20 до 80 нм змінюється в дуже вузькому інтервалі (від $2 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ K⁻¹). Уперше отримана залежність КТ від параметра Грюнайзена при фіксованих значеннях коефіцієнта Пуассона: в області пружної деформації (до 0,4%) величина КТ зростає в інтервалі 4-5 одиниць при зміні параметра Грюнайзена від 1,8 до 2,5 одиниці. Уперше встановлена наближена концентраційна залежність питомого опору, середньої довжини вільного пробігу та енергії Фермі для т.р., в тому числі і високоентропійних сплавів з числом компонент від 4 до 5. На основі феноменологічної моделі запропоновані два нових магнітних коефіцієнта, які є мірою чутливості анізотропного і ГМО до зовнішнього магнітного поля. Теоретичні співвідношення добре узгоджуються із відповідними експериментальними результатами.

11. Номер та назва звітнього етапу (за наявності): Етап № 2 «Фазова рівновага і електрофізичні властивості 5-6 компонентних плівкових сплавів».

12. Опис процесу реалізації (хід виконання, які дослідження проводились, які методики використовувались тощо) проекту за звітнім етапом (до 50 рядків)

Процес реалізації завдань включає в себе два етапи. На першому із них нами був здійснений аналіз наступного питання: в яких випадках при розрахунках фізичних властивостей і характеристик можна використовувати принцип (концепцію) їх адитивності. Потреба в отриманні хоча би частково розрахункових даних продиктована складністю і громіздкістю постановки експериментів. Було встановлено, що принцип адитивності може бути застосований при розрахунках середніх величин властивостей чи характеристик твердих розчинів (т.р.), в тому числі і високоентропійних сплавів (ВЕС) у випадку, коли для кожної компоненти властивість чи характеристика носить не колективний, а власний характер. Мова може йти про розміри, масу і магнітний момент атомів; температуру Дебая; відносну зміну питомого опору при термовідпалюванні або деформації. У той же час температура плавлення, середня довжина вільного пробігу електронів, енергія Фермі та ряд інших величин носять колективний характер і їх не можна обраховувати як середні для т.р. На цьому ж етапі були проведені розрахунки на прикладі 5-ти і 6-ти компонентних масивних систем концентраційних залежностей для термічного коефіцієнту опору та, як еталонні розрахунки, для параметра решітки і температури Дебая. Був зроблений висновок, що поряд із залежностями цих

властивостей і характеристик від концентрації допіруючого елемента, яким по черзі виступають усі п'ять чи шість елементів металевої системи на основі Fe, Co, Ni, Cu, Cr, або Al чи Ti. Чотири чи п'ять елементів розглядаються як фазоутворюючі і їх атомна доля задається як еквіатомна. Був зроблений висновок, що концентраційні залежності властивостей чи характеристик необхідно доповнити аналогічними залежностями для інтегрального і диференційного концентраційних коефіцієнтів, які вперше нами були введені у розгляд. Величини і знак цих коефіцієнтів дозволяють більш коректно здійснити прогноз фізичних властивостей чи характеристик.

На другому етапі досліджень була здійснена експериментальна перевірка розрахункових результатів стосовно електрофізичних властивостей (термічний коефіцієнт опору (ТКО); коефіцієнт поздовжньої тензочутливості (КТ); середня довжина вільного пробігу електронів (СДВП)) та динамічної характеристики – параметра решітки (ВЕС). З цією метою були отримані п'ятикомпонентні плівкові зразки ВЕС на основі атомів Fe, Co, Ni, Cu і Al методом одночасної конденсації п'яти компонент (перший варіант) або пошарової конденсації окремих компонент (другий варіант) із наступною термообробкою.

Ця методика була вперше запропонована виконавцями проєкту раніше і підтверджена Патентом на корисну модель України. Складність експерименту полягає в тому, що кожна компонента випаровується окремо резистивним або електронно-променевим методом і ефективна товщина осадків вимірюється також окремо. Після цього проводяться вимірювання фізичних властивостей чи характеристик. Нехватка часового і фінансового ресурсу обумовили проведення експериментальних досліджень у варіанті контрольних вимірювань.

Після підготовки зразків і проведення досліджень їх властивостей в обов'язковому порядку здійснюються електронно-мікроскопічні, електронографічні та спектроскопічні дослідження методом мікроаналізу. Весь комплекс досліджень дозволяє зробити висновки про фазову рівновагу у плівкових ВЕС, про їх фазовий і елементний склад, про величину фізичних властивостей і характеристик.

13. Результати виконання звітнього етапу відповідно до технічного завдання/календарного плану:

13.1 Заплановані завдання звітнього етапу проєкту (*перерахуйте завдання звітнього етапу, окреслені у запиті (технічному завданні/календарному плані) проєкту*) (до 20 рядків):

Заплановані завдання етапу №2 проєкту

2. Сформулювати умови фазової рівноваги в 5-6-ти компонентних плівкових сплавах.

2.1. Дослідити фазову рівновагу в 5-6 компонентних плівкових сплавах на основі Cr, Cu, Fe, Ni, Co, Al або Ti. Запропонувати методику розрахунків залежності електрофізичних властивостей у багатокомпонентних масивних системах (термічний коефіцієнт опору; коефіцієнт поздовжньої тензочутливості; СДВП) у залежності від атомної долі (концентрації) допіруючого елемента, яким по черзі виступають усі компоненти системи.

2.2. Провести дослідження електрофізичних властивостей плівкових сплавів, в тому числі і високоентропійних, з метою порівняння ступеню відповідності розрахункових і

експериментальних результатів, що може бути критерієм правильності запропонованої методики розрахунків фізичних властивостей чи характеристик.

2.3. Узагальнення експериментальних результатів стосовно електрофізичних властивостей 5-6-ти компонентних плівок. Результати розрахунків параметрів електроперенесення для 5-ти компонентних плівкових сплавів.

2.4. Обробка результатів дослідження. Аналіз і узагальнення результатів досліджень фазової рівноваги та електрофізичних властивостей масивних і плівкових багатокомпонентних матеріалів.

13.2 Отримані результати звітнього етапу проекту (*опишіть отримані результати виконавцями протягом звітнього періоду, посилаючись на заплановані та досягнуті цілі, задачі та індикатори виконання, згадані в технічному завданні/календарному плані дослідження. Включіть посилання на публікації у наукових виданнях, інші показники з п. 18, що є підтвердженням досягнення результатів виконання етапу, якщо такі показники передбачені*) (до 70 рядків)

Отримані результати етапу №2 проекту.

1. Отримано результати дослідження фазової рівноваги в 5-6 компонентних плівкових сплавах на основі Cr, Cu, Fe, Ni, Co, Al або Ti. Проведені електронно-мікроскопічні та дифракційні дослідження дозволили встановити температурний режим гомогенізації 5-ти і 6-ти компонентних плівкових систем, що є першою умовою фазової рівноваги багатокомпонентної системи. Додатковою умовою фазової рівноваги є запропонований критерій, а саме умова еквіатомності усіх 5-ти чи 6-ти компонент, коли фізичні властивості чи характеристики мають сталу величину незалежну від типу допіруючого елемента, тобто рівноважна атомна доля $x_p = n^{-1}$, де n – число компонент.

2. Отримано результати дослідження електрофізичних властивостей плівкових сплавів на основі Cr, Cu, Fe, Ni, Co, Al або Ti і концентраційні залежності питомого опору, термічного коефіцієнту опору і коефіцієнта тензочутливості. Отримано результати розрахунків параметрів електроперенесення для 5-и - 6-и компонентних плівкових сплавів. Детально проаналізовано питання про можливість і точність розрахунків на основі концепції (принципу) адитивності фізичних величин у багатокомпонентних сплавах, у т.ч. і високоентропійних. Суть принципу адитивності полягає в допущенні, що середнє значення певної фізичної величини для твердого розчину (т.р.) багатокомпонентного сплаву можна представити у вигляді суми доданків, кожен із яких представляє собою добуток вказаної величини кожного металу на його концентрацію. Було встановлено, що у випадку питомого опору і СДВП принципом адитивності можна скористуватись наближено. Це пов'язано із тією обставиною, що питомий опір кожного металу обернено пропорційний концентрації валентних електронів і їх середній довжині вільного пробігу (СДВП). Оскільки електрони у т.р. колективізуються, то їх СДВП втрачає індивідуальність і приймає якусь узагальнену величину, яка визначається внутрішнім потенціалом кристалічної решітки, а принцип адитивності спрацьовує більш точно, якщо т.р. сформується як ВЕС. У загальному випадку багатокомпонентного сплаву зміна величини СДВП обумовить більше відхилення розрахункових і експериментальних значень електрофізичних величин. У випадку ТКО і КТ, для яких відносно зміну питомого опору при нагріванні або деформації можна розглядати як умовно власні характеристики, що дозволяє при розрахунках ТКО і КТ скористатися принципом адитивності.

3. Здійснено узагальнення результатів дослідження електрофізичних властивостей плівкових сплавів на основі Cr, V (Cu), Fe, Ni, Co, Ti та результатів розрахунків

параметрів електроперенесення для 5-6-и компонентних плівкових сплавів. Більш детально проаналізовано питання стосовно того, які фізичні властивості та характеристики атомів можна вважати власними, що дає можливість застосувати стосовно них принцип адитивності. До них ми віднесли параметр решітки; температуру Дебая; магнітний момент і намагніченість, концентраційні залежності яких розширяють наші уявлення про фізичні властивості багатокомпонентних сплавів. Крім того можливість точного експериментального вимірювання параметра решітки плівкового т.р. відкриває можливість апробації теоретичних розрахунків, що були здійснені нами. А також близькість розрахункових і експериментальних значень параметра решітки може слугувати критерієм правильності запропонованої нами методики розрахунків.

4. Проведено обробку результатів аналізу і узагальнення даних про фазову рівновагу в багатокомпонентних плівкових сплавах та їх електрофізичних властивостей. Порівняння експериментальних і розрахункових даних для ТКО і КТ вказує на меншу узгодженість, особливо у випадку КТ, ніж для параметра решітки. Нами це пояснюється проявом розмірного ефекту у плівкових зразках, товщина яких змінювалася у межах 20-80 нм. У випадку питомого опору, СДВП, температури плавлення, енергії Фермі не може бути застосований принцип адитивності, оскільки вказані фізичні властивості та характеристики не є власними характеристиками, а колективними, тобто результатом колективної поведінки атомів або електронів багатокомпонентної системи.

Введені до розгляду так звані концентраційні коефіцієнти, які характеризують вплив допіруючого елемента на певну фізичну властивість чи характеристику. Величина і знак інтегрального і диференційного концентраційних коефіцієнтів дозволяють досить точно спрогнозувати величину властивості чи характеристики без об'ємних обчислень і постановки громіздких експериментів.

13.3 Відхилення від календарного плану дослідження (за наявності) *(вказіть та детально обґрунтуйте можливі відхилення від технічного завдання/календарного плану дослідження та їх потенційний вплив на подальше виконання проєкту (до 30 рядків):*

Відхилення від календарного плану дослідження має характер додаткових теоретичних досліджень залежності параметра решітки і температури Дебая від концентрації допіруючих елементів. Підставою до проведення цих додаткових досліджень було те, що результати розрахунків для масивних зразків і експериментальних вимірювань для плівкових т.р. можна порівнювати між собою. Незначне зменшення параметра решітки у плівкових т.р. (до 0,002 нм) в результаті дії розмірного ефекту можна точно врахувати і це дозволило зробити висновок про коректність розрахунків за нашою методикою концентраційної залежності не тільки у випадку параметра решітки, а і других фізичних властивостей і характеристик. З такою ж метою були здійснені розрахунки концентраційної залежності температури Дебая, які також порівнювалися із експериментальними стосовно її зменшення у тонких плівках. На жаль такі результати відомі в дуже обмеженій кількості, але в обох випадках здійсненої апробації ми підтверджуємо коректність запропонованої методики розрахунків концентраційних залежностей.

14. Наукова цінність і актуальність отриманих результатів (науково-технічної продукції), їх порівняння з українськими та/або кращими закордонними аналогами (до 30 рядків)

Наукова цінність і актуальність досліджень НДР обумовлена тим, що нами було запропоновано вивчення кінетичних і магніторезистивних властивостей плівкових багатокомпонентних сплавів, у тому числі і ВЕС. Дослідження такого характеру були вперше започатковані авторами проекту, що і визначає їх новизну і актуальність, оскільки плівки товщиною до 100 нм представляють собою інший клас сплавів по відношенню до масивних покриттів. Якщо кінетичні та магніторезистивні властивості 2-3-х компонентних плівок у принципі вивчені, то для 4-6-ти і більше компонентних плівкових сплавів вони лише започатковані. Накопичення експериментальних та розрахункових даних має самодостатню цінність, і ці дані будуть використані при розробці бар'єрних шарів, високотемпературних чутливих елементів різних сенсорів та в інших проблемах прикладного характеру.

Результати, отримані при виконанні 2 етапу НДР мають наукову цінність як із фундаментальної, так і прикладної точки зору для таких галузей знань як металофізика та матеріалознавство. У даному проекті запропонована нова концепція формування багатокомпонентних сплавів нанорозмірних товщин, коли поряд із розмірними себе проявляють концентраційні ефекти. Результати досліджень 2 етапу НДР розширили уявлення про фазову рівновагу в середньо- та високоентропійних плівкових сплавах; дозволили розрахувати основні параметри електроперенесення.

В сучасних наукових публікаціях вітчизняних та закордонних вчених представлені результати досліджень, які в основному розширюють і доповнюють дослідження попередніх років. Мова іде про ВЕС із такими перспективними властивостями як висока зносостійкість (ВЕС на основі Co, Cr, Fe, Ni, Ti, Al), міцність (на основі Al, Co, Cr, Fe, Ni), стійкість до корозії (на основі Cu, Ni, Co, Cr, Fe, Si). У ряді робіт обговорюється питання термодинаміки та кінетики при слабкій дифузії та фізичні, магнітні, хімічні, механічні властивості. Великий об'єм результатів досліджень фазового складу і властивостей ВЕС виконали вітчизняні вчені С.О. Фірстов, М.П. Семенько, О.М. Мисливченко та їх наукові групи, які інтенсивно проводять дослідження електрофізичних і механічних властивостей ВЕС. Серед результатів зарубіжних дослідників необхідно виділити роботи Wani I.S. et al., Sebesta J. et al., Guillot I. et al., в яких детально вивчена кореляція між кристалічною структурою та магнітними і механічними характеристиками ВЕС. Швидкими темпами розвиваються дослідження щодо застосування ВЕС для 3D-друку.

15. Практична цінність результатів для потреб оборони, безпеки, економіки та/або суспільства України (у разі наявності) (до 30 рядків)

1. Очікувані результати будуть мати наукову цінність як із фундаментальної, так і прикладної точки зору для таких галузей знань як металофізика та матеріалознавство вітчизняної науки. Це підтверджується тим фактом, що при виконанні проекту запропонована нова концепція формування багатокомпонентних сплавів нанорозмірних товщин, коли поряд із розмірними себе проявляють і концентраційні ефекти. Такі результати пріоритетні для наукової спільноти України та їх можна розглядати як важливий внесок у світову науку.

2. При реалізації основних завдань проекту буде отриманий інноваційний науково-технічний продукт завершеної форми, зокрема, будуть запропоновані чутливі елементи

плівкових сенсорів різних фізичних характеристик (термодатчики, тензодатчики, магнітодатчики), що знайде своє застосування для потреб оборони і безпеки та економіки України.

3. Отримані результати розширюють уявлення про фазову рівновагу в середньо- та високоентропійних плівкових сплавах; дозволяють отримувати плівкові матеріали на основі одних і тих же компонент, в яких температура Дебая може змінюватися в інтервалі до 45-50 К, а параметр решітки до 0,2 нм, що може бути застосовано в галузі акустоелектроніки.

16. Основні кількісні показники/індикатори* виконання звітнього етапу **за темою** проекту:

№ з/п	Показники/індикатори	Заплановано (відповідно до запиту на фінансування /ТЗ/КП тощо), кількість	Виконано (за результатами етапу), кількість
1.	Публікація результатів:		
1.1.	Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних: - Scopus та/або Web of Science Core Collection, всього, од.		
	з них із квантилем Q1 і Q2 на момент опублікування, од.	2	1 на стадії рецензування
	з них із квантилем Q3 і Q4 на момент опублікування, од.	3	4
1.2.	Статті у виданнях, які містять інформацію з обмеженим доступом (для проєктів оборонного та/або подвійного призначення), од.		
1.3.	Статті у наукових журналах (без квантилю), збірниках наукових праць, матеріалах конференцій тощо, що індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection (крім тих, що увійшли до п.1.1), од.		1
1.4.	Статті у фахових виданнях України категорії «Б», од.		
1.5.	Статті у періодичних виданнях інших країн, що мають ISSN, од.		
1.6.	Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України та не індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection, од.	0	2
1.7.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) у закордонних видавництвах іноземними мовами, од.		
1.8.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) в українських видавництвах, од.		
1.9.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) з обмеженим доступом (для проєктів оборонного та/або подвійного призначення), од.		
1.10.	Підручники, навчальні посібники, од.		
1.11.	Словники, довідники, енциклопедії, видані українськими та/або закордонними видавництвами, од.		
1.12.	Інші публікації, які не описані у пп. 1.1-1.11, од.		
2.	Презентація та дисемінація результатів:		
2.1.	Міжнародні науково-комунікативні заходи, конференції, од.		2
2.2.	Всеукраїнські та регіональні науково-технічні/промислові виставкові заходи, од.		
2.3.	Представлення розробки/бізнес-плану/результатів проєкту на:		
	- інноваційних фестивалів, од.		
	- конкурсах стартапів, од.		
	- акселераційних програмах, од.		
	- хакатонах, од.		

№ з/п	Показники/індикатори	Заплановано (відповідно до запиту на фінансування /ТЗ/КП тощо), кількість	Виконано (за результатами етапу), кількість
2.4.	Науково-популярні публікації з метою поширення інформації про результати проекту для загальної (широкої) аудиторії, од.		
2.5.	Представлення інформації про результати проекту на науково-популяризаційних заходах (Дні науки, Наукові пікніки тощо) , од.		
2.6.	Інші заходи, які не описані у пп. 2.1-2.5, од.		
3.	Підготовка наукових кадрів:		
3.1.	Захищено дисертацій доктора наук авторами проекту або під консультуванням авторів у рамках тематики проекту, од.		
3.2.	Захищено дисертацій доктора філософії авторами проекту або під керівництвом авторів у рамках тематики проекту, од.		
4.	Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності (ОПІВ)		
4.1.	Отримано патентів України на винахід, од.		
4.2.	Отримано патентів України на промисловий зразок , од.		
4.3.	Отримано патентів України на корисну модель, од.		
4.4.	Отримано охоронний документ на ОПІВ інших країн, од.		
4.5.	Інші ОПІВ, які не описані у пп. 4.1-4.4, од.		
4.6.	Подано заявок на отримання охоронного документу на ОПІВ України та /або інших країн, од.		
5.	Впровадження та використання наукових або науково-технічних (прикладних) результатів:		
5.1.	Підписання (укладання) договорів (угод) організацією-виконавцем проекту (грантоотримувачем) на впровадження (використання) результатів проекту (окрім індивідуальних), серед них:		
5.1.1	Господарських договорів/контрактів, од./тис.грн		
5.1.2	Ліцензійних договорів/договорів на ноу-хау, од./тис.грн		
5.1.3	Грантових угод (держаного рівня), од./тис.грн		
5.1.4	Грантових угод (міжнародного рівня), од./тис.грн		
5.1.5	Інші договори (угоди), які не описані у пп. 5.1.1-5.1.3, од./тис.грн		
5.2.	Документально підтверджено використання результатів у практиці органів державної/місцевої влади, суспільних практиках тощо, од.		
5.3.	Проведено маркетингові дослідження, перемовини з потенційними замовниками із підписанням протоколу (меморандуму, угоди) про наміри комерційного впровадження результатів, од.		
5.4.	Подано заявок на державні, міжнародні наукові гранти (окрім індивідуальних) , од.		1
5.5.	Впроваджено у освітній процес ЗВО/НУ з відповідним підтвердженням, од.		
5.6.	Інші варіанти впровадження, які не описані у пп. 5.1-5.5, од.		
6.	Створено чи істотно удосконалено/покрашено існуючі:		
6.1.	Пристрої (макет, експериментальний/дослідний зразок) , од.		
6.2.	Матеріали, процеси, технології, технологічні регламенти, цифрові продукти та електронні сервіси, од.		
6.3.	ТУ, ДСТУ, будівельні норми, зареєстровані проекти законодавчих актів, од.		
6.4.	Наукові (науково-технічні) послуги, од.		
6.5.	Іншу продукцію, яка не описана у пп. 6.1-6.4, од.		
7.	Участь з оплатою у виконанні проекту (штатних одиниць/осіб) згідно з Додатком 1:		
7.1.	Студентів (здобувачів вищої освіти I-II рівнів), шт.од./ осіб		1
7.2.	Аспірантів (здобувачів вищої освіти III рівня) , шт.од./ осіб		
7.3.	Молодих вчених, шт.од./ осіб		

* - до показників/індикаторів таблиці п. 16 не можуть бути включені будь-які публікації (включно із співавторством), конференції, впровадження, охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності тощо держав (їх представників), визнаних в установленому порядку державою-агресором або державою-окупантом, або держав, що не визнають тимчасово окуповані, починаючи з березня 2014 року, території України такими, що належать Україні.

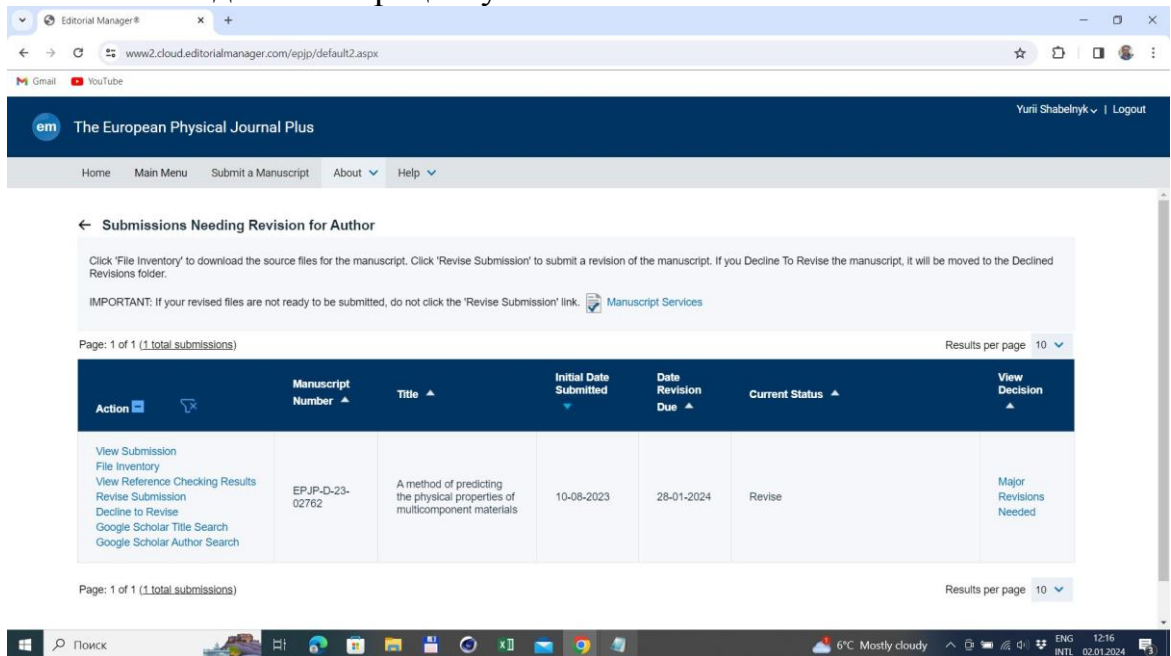
17. Відхилення від запланованих показників/індикаторів, зазначених у п. 16

Крім розглянутого у п. 13.3, відхилення від календарного плану, необхідно вказати, що нами планувалася публікація двох статей в журналах із квартелем Q1 – Q2, на даний момент одна із них знаходиться на стадії рецензування і може бути опублікована лише в 2024 р. Недовиконання публікацій у журналах з квартелями Q1 – Q2 частково компенсується публікацією додаткової статті у журналі з кварталом Q4.

18. Вихідні дані щодо показників виконання відповідно до пунктів п. 16 з додаванням WEB-посилання (за наявності) на ресурси, де вони розміщені:

1. Protsenko I.Yu., Shumakova M.O., Rylova A.K., Shumakova N.I. The Concentration Dependences of Lattice Parameters and Debye Temperature in Multicomponent Solid Solutions // *Metallophysics and Advanced Technologies*. – 2023- V.45, №7. – P. 857–864 <https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0857>
2. Shyshko N.S. , Shabelnyk Yu.M. , Kolesnichenko Yu.A. , Shkurdoda Yu.O. , Pronoza A.O. , Chornous A.M., Dekhtyaruk L.V. Justification of the Giant Magnetoresistance Effect in Co/Cu/Co and Fe/Cr/Fe Magneto-Ordered Three-Layer Structures by Using the Fuchs Formula // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2023. – V.15, №1. – P. 01029-1 - 01029-5. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(1\).01029](https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01029)
3. Protsenko I.Yu. On the Possibility of Applying the Principle of Physical Quantities Additivity of Multicomponent Metallic Materials // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2023. – V.15, №5. – P.05011-1 – 05011-3. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(5\).05011](https://doi.org/10.21272/jnep.15(5).05011)
4. Odnodvoretz L.V. , Shabelnyk Yu.M., Shumakova N.I., Pasko O.O. , Tolstikov D.I. , Nazarenko D.S. Deformation and Magnetoresistive Properties of Low Entropy Functional Film Materials Based on Fe and Pd or Pt // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2023. – V.15, №6. – P.06030-1 – 06030-4. https://jnep.sumdu.edu.ua/en/full_article/3814
5. Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu., Shumakova N.I., Protsenko S.I. Phase composition and magnetoresistive properties of sensor electronic elements based on multicomponent film alloys / IV Міжнародна науково-практична конференція «Grundlagen der modernen wissenschaftlichen Forschung der Sammlung wissenschaftlicher Arbeiten «ΛΟΓΟΣ». – Цюрих, 31 березня 2023. – 2023. – P.127 – 128. <https://archive.logos-science.com/index.php/conference-proceedings/article/view/635>
6. Odnodvoretz L.V., Shabelnyk Yu.M., Pushkar S., Nazarenko D. Temperature coefficient of resistance of metal films as elements of flexible electronics / II International Scientific and Theoretical Conference «Scientific method: reality and future trends of researching». – 2023. – Scientia, August 25, 2023. – Zagreb, Republic of Croatia. – P. 123 – 124. DOI [10.36074/scientia-25.08.2023](https://doi.org/10.36074/scientia-25.08.2023)

7. Protsenko S., Odnodvoret L., Shabelnyk Yu., Lobodiuk O., Shumakova N., Protsenko I. Multicomponent Functional Materials: Kinetic and Magnetoresistive Properties / 2023 IEEE 13 th International Conference “Nanomaterials: Applications & Properties” (IEEE NAP – 2023). – 2023. - P. eP29. https://ieeenap.org/data/IEEE_NAP2023_Program.pdf
8. Стаття знаходиться на рецензуванні:



До звіту додаються електронні* копії наукових публікацій, охоронних документів, інша наукова продукція (окрім матеріалів, які містять інформацію з обмеженим доступом) (Додаток 2).

* - у випадку необхідності надання друкованої версії звіту, до нього додаються друковані додатки (окрім великих (більше 50 стор.) за обсягом монографій, підручників, словників тощо та матеріалів, які містять інформацію з обмеженим доступом).

19. Рішення** вченої (наукової, науково-технічної, технічної) ради або іншого керівного (дорадчого) органу (за відсутності зазначеної ради) організації-виконавця проєкту щодо результатів розгляду проміжного звіту:

Наукова рада Сумського державного університету затвердила проміжний звіт і відмітила відповідність виконаних за проєктом робіт технічному завданню НДР. Результати виконання НДР відповідають технічному завданню і календарному плану, протокол №11 від 28.12.2023 р.

** - зазначається і надається лише у випадку наявності відповідних вимог від замовника/грантодавача. Також до звіту необхідно додати копію витягу з протоколу засідання відповідної ради (органу) в електронному (друкованому) вигляді (Додаток 3 до звіту).

20. Анотація основних результатів звітної етапу проекту (готується українською та англійською мовами (до 30 рядків кожною мовою), у форматі, придатному для розуміння загальною аудиторією (науково-популярним стилем) (Додаток 4 до звіту).

Додаток 1
до проміжного звіту

Перелік виконавців проекту з оплатою праці

№	Прізвище, ім'я, науковий ступінь, вчене звання (особистий підпис, у разі необхідності)	Основне місце роботи або здобуття освіти	Зазначити вік та наявність статусу молодого вченого (на момент подання звіту)	Посада за проектом (або договір ЦПХ) та роль у проекті (керівник, відповідальний виконавець, виконавець, студент, аспірант тощо)	Основні завдання у проекті (стисло зазначити функції)
1	Проценко Сергій	СумДУ		Керівник	Загальне керівництво, підготовка публікацій
2	Шумакова Наталія	СумДУ		Відповідальний виконавець	Підготовка анотованих звітів, участь у підготовці статей, планування видів робіт
3.	Однодворець Лариса	СумДУ		Виконавець	Підготовка публікацій, проміжного звіту
4	Проценко Іван	СумДУ		Виконавець	Узагальнення результатів. Підготовка публікацій, проміжного звіту
5	Шабельник Юрій	СумДУ		Виконавець	Проведення експериментальних досліджень. Підготовка тез доповідей
6.	Лободюк Олена	СумДУ		Виконавець	Оформлення звітної документації

Додаток 2
до проміжного звіту

Копії наукових публікацій, охоронних документів, іншої друкованої наукової продукції

Додаток 3
до проміжного звіту

Копія витягу з протоколу засідання відповідної ради (органу) щодо результатів розгляду проміжного звіту

Анотація основних результатів етапу № 2 проєкту

«Багатокомпонентні плівкові матеріали: кореляція між електрофізичними і магніторезистивними властивостями та концентрацією елементів», № 0122U000785. Керівник – д-р фіз.-мат. наук, проф. Проценко С.І.

Під час виконання завдань були одержані такі нові наукові результати:

1. Установлено, що концепція (принцип) адитивності фізичних величин може бути застосована у випадку термічного коефіцієнту опору (ТКО), коефіцієнту тензочутливості (КТ) та параметра решітки і температури Дебая. Це пояснюється тим, що вказані величини можна вважати власними характеристиками окремих компонент. Так, для ТКО і КТ власною характеристикою можна вважати відносну зміну опору, а для параметра решітки і температури Дебая – розмір атомів або їх масу, яка буде визначати дебаєвську частоту. У всіх інших випадках (питомий опір, середня довжина вільного пробігу електронів (СДВП), температура плавлення) вказані величини не можна вважати власними характеристиками, оскільки вони є результатом колективної поведінки атомів багатокомпонентних систем.

2. Здійснена апробація запропонованої методики розрахунків фізичних властивостей і характеристик (ТКО, КТ, параметр решітки, температура Дебая) еквіатомних 5-6 –ти компонентних твердих розчинів (т.р.) на основі Fe, Co, Ni, Cu, Cr, Al. Отримана задовільна відповідність розрахункових експериментальних результатів для плівкових т.р. у випадку ТКО, КТ і параметра решітки.

3. Вперше запропонована міра кількісної характеристики впливу концентрації допіруючого елемента на електрофізичні величини і характеристики, інтегральний і диференціальний концентраційні коефіцієнти, величина і знак яких дають інформацію про характер впливу того чи іншого допіруючого елемента.

4. При реалізації основних завдань проєкту буде отриманий інноваційний науково-технічний продукт завершеної форми, зокрема, будуть запропоновані чутливі елементи плівкових сенсорів різних фізичних характеристик. (термодатчики, тензодатчики, магніодатчики). Отримані результати розширюють уявлення про фазову рівновагу в середньо- та високоентропійних плівкових сплавах; дозволяють отримувати плівкові матеріали на основі одних і тих же компонент, в яких температура Дебая може змінюватися в інтервалі до 45-50 К, а параметр решітки до 0,2 нм, що може бути застосовано в галузі акустoeлектроніки.

Abstract of the main results of the stage № 2 of the project

"Multicomponent film materials: correlation between electrophysical and magnetoresistive properties and element concentration", No. 0122U000785. The leader is Dr. Phys.-Math. Sciences, Prof. Protsenko S.I.

During the execution of tasks, the following new scientific results were obtained:

1. It was established that the concept (principle) of the additivity of physical quantities can be applied in the case of the thermal coefficient resistance (TCR), the strain coefficient (SC) and the lattice parameter and Debye temperature. This is explained by the fact that the specified values can be considered the own characteristics of individual components. Thus, for TCR and SC, the relative change in resistance can be considered an intrinsic characteristic, and for the lattice parameter and Debye temperature – the size of atoms or their mass, which will determine the Debye frequency. In all other cases (specific resistance, mean free path of electrons (MFPE), melting temperature), the specified values cannot be considered as their own characteristics, since they are the result of the collective behavior of atoms of multicomponent systems.

2. Approbation of the proposed methodology for calculating physical properties and characteristics (TCR, SC, lattice parameter, Debye temperature) of equiatomic 5-6 component solid solutions (s.s.) based on Fe, Co, Ni, Cu, Cr, Al was carried out. Satisfactory correspondence of the calculated experimental results for film s.s. was obtained in the case of TCR, SC and lattice parameter.

3. For the first time, a measure of the quantitative characteristics of the influence of the concentration of the proppant element on electrophysical quantities and characteristics, integral and differential concentration coefficients, the value and sign of which provide information about the nature of the influence of this or that proppant element, was proposed.

4. When implementing the main tasks of the project, an innovative scientific and technical product of a complete form will be obtained, in particular, sensitive elements of film sensors of various physical characteristics will be offered. (thermometers, strain gauges, magnetic sensors). The obtained results expand the concept of phase equilibrium in medium- and high-entropy film alloys; allow obtaining film materials based on the same components, in which the Debye temperature can vary in the range of up to 45-50 K, and the lattice parameter up to 0.2 nm, which can be used in the field of acoustoelectronics.