

**ЕЛЕКТРОХІМІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ**

- 1. КОЛБАСОВ Геннадій Якович** – член-кореспондент НАН України, доктор хімічних наук, професор, завідувач відділу електрохімії і фотоелектрохімії неметалічних систем Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського НАН України
- 2. КУБЛАНОВСЬКИЙ Валерій Семенович** – доктор хімічних наук, професор, завідувач відділу електрохімічного матеріалознавства та електрокаталізу Інституту загальної та неорганічної хімії ім.В.І.Вернадського НАН України
- 3. БЕРСІРОВА Оксана Леонідівна** - доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу електрохімічного матеріалознавства та електрокаталізу Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського НАН України
- 4. САХНЕНКО Микола Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» МОН України
- 5. ВЕДЬ Марина Віталіївна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» МОН України
- 6. КУНТИЙ Орест Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімії і технології неорганічних речовин Національного університету «Львівська політехніка» МОН України
- 7. РЕШЕТНЯК Олександр Володимирович** – доктор хімічних наук, професор, в.о. завідувача кафедри фізичної та колоїдної хімії Львівського національного університету ім. Івана Франка МОН України
- 8. ПОСУДЄВСЬКИЙ Олег Юлійович** – доктор хімічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу вільних радикалів Інституту фізичної хімії ім.Л.В. Писаржевського НАН України

РЕФЕРАТ

Київ - 2021

Реферат роботи
«ЕЛЕКТРОХІМІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ»
акронім – ЕФМС

Вступ. В роки, що передували розбудові самостійної і незалежної України, та за період існування нашої молоді держави були започатковані наукові дослідження у галузі електрохімічного матеріалознавства, що присвячені встановленню фундаментальних наукових положень та розробці принципів керованого електрохімічного синтезу металічних, оксидних, полімерних, композиційних, гібридних матеріалів з прогнозованими структурою, складом та функціональними властивостями. Такі функціональні матеріали необхідні для електрохімічної енергетики, опто-, нано- та мікроелектроніки, електрохімічного синтезу, вони вже широко використовуються у різноманітних системах – сенсорних, електрохромних, електрокаталітичних, фотоелектрохімічних, для антикорозійного захисту, їх потребують практично всі сучасні високотехнологічні виробництва – від виготовлення мініатюрних мікросхем до об'єктів аерокосмічної галузі. Стрімкий технологічний розвиток останніми роками диктує необхідність переходу промисловості до стану повної автоматизації для забезпечення гнучкого керування, адаптованого до потреб конкурентноспроможного ринку, запити якого невпинно змінюються. До того ж, посилюються вимоги до відповідності сучасних промислових технологій все більш жорстким екологічним та іншим нормам.

Все це потребує створення наукового підґрунтя нових інноваційних технологій. Саме тому у полі зору вчених опинився керований електрохімічний дизайн функціональних матеріалів і систем різноманітного призначення, теорія і практика якого склали ідеологію представленої колективної роботи «Електрохімія функціональних матеріалів і систем» (ЕФМС).

Цей напрям розвитку української науки і техніки з великим успіхом розвивають вчені-електрохіміки на теренах українських земель від заходу до сходу нашої незалежної країни. Паралельно з науковцями Києва, представниками славетних науково-дослідних інститутів Національної академії наук України – Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського та Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського, цією тематикою плідно займалися вчені-освітяни харківської наукової школи з Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», і львів'яни - з Національного університету «Львівська політехніка» та Львівського національного університету імені Івана Франка.

Роботи, які координувалися Науковою Радою НАН України з проблеми "Електрохімія", дали змогу вперше у світовому електрохімічному матеріалознавстві сформулювати та науково обґрунтувати основні принципи керування процесами електроосадження та електрохімічного синтезу, структурою та комплексом функціональних властивостей покриттів металами, сплавами, оксидами металів, композитами, полімерами, що сприяло подальшому розвитку сучасного хімічного матеріалознавства.

Успіхи в цьому напрямі досліджень дали можливість розробити та впровадити нові матеріали і технології для їх електрохімічного формування, а також для ефективної поверхневої обробки деталей і виробів та надання їм принципово нових, недосяжних раніше експлуатаційних властивостей. Отримані видатні результати фундаментальних наукових досліджень у царині електрохімічного матеріалознавства здобули міжнародне визнання і сприяли утвердженню високого авторитету вітчизняної науки у світі.

Актуальність роботи. Ми живемо в епоху завершення третьої, цифрової революції, що почалася в другій половині минулого століття, на зміну якій вже приходить четверта, нова промислова революція. Основними рисами інформаційної революції є швидкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, автоматизація та роботизація виробничих процесів. Характерні ознаки Індустрії 4.0 - це повністю автоматизовані виробництва, на яких керування всіма процесами здійснюється в режимі реального часу і з урахуванням мінливих зовнішніх умов. Кіберфізичні системи створюють віртуальні копії об'єктів фізичного світу, контролюють фізичні процеси і приймають децентралізовані рішення. Вони здатні об'єднуватися в одну мережу, взаємодіяти в режимі реального часу, самоналагоджуватися і самонавчатися. Важливу роль відіграють інтернет-технології, що забезпечують комунікації між персоналом та машинами. Підприємства виробляють продукцію відповідно до вимог індивідуального замовника, оптимізуючи собівартість виробництва. Все це відбувається на наших очах і ми намагаємося адаптувати класичну науку і технологію до нових реалій, бо саме за ними майбутнє.

В представленій роботі авторами було закладено наукове підґрунтя переходу від «Електрохімії функціональних матеріалів і систем» до новітнього стану розвитку, який, за усталеною термінологією сьогодення, можна формулювати як «Електрохімія функціональних матеріалів і систем 4.0», що характеризується наступними ознаками:

- повна відмова від емпіричного пошуку функціональних матеріалів і систем (ФМС) задля розв'язання потреб будь-яких споживачів цільової продукції,
- проектування ФМС за результатами розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних технологій, зокрема штучних нейронних мереж, на підґрунті фундаментальних властивостей і атомно-молекулярних характеристик вихідних компонентів;
- активне впровадження в обіг/практику електрохімічних технологій виробництва багатокомпонентних матеріалів і покриттів з реалізацією синергетичних ефектів, що дозволяє підвищувати рівень функціональних властивостей ФМС відносно до вихідних матеріалів, їх ефективність та ресурс виробів;
- широке впровадження в обіг/практику електрохімічних технологій виробництва мультишарових матеріалів і покриттів з метою надання нових властивостей таким субстанціям і створення smart-матеріалів (активні діелектрики, мультифероїки і т.і.) та реалізації ресурсо- і матеріалоощадних технологічних процесів;

- органічний перехід від планування властивостей виробів на мікро- та мезорівні до нанорівня з широким застосуванням обох підходів виробництва таких ФМС – як «знизу-вгору», так і «зверху-вниз» (диспергування оксидів як другої фази електролітичних композитів, тощо);
- поступова відмова від застосування монометалевих і монооксидних ФМС на користь композитів – з металевою та/або оксидною матрицями;
- розроблення і впровадження в практику виробництва металоксидних композиційних електролітичних покриттів (КЕП), друга фаза яких є інтермедіатом електродних реакцій, тобто утворюється *in situ* в процесі синтезу, що суттєво підвищує стабільність електролітів та дозволяє керувати складом, а відтак і властивостями цільових продуктів за рахунок варіації параметрів електролізу;
- реалізація новітньої концепції генезису металоксидних систем з метою електрохімічного дизайну функціональних матеріалів шляхом інверсії структурних елементів металоксидних композитів «матриця – друга фаза» за рахунок варіації технологічних засад та інтеграції в єдиному технологічному циклі декількох електрохімічних способів синтезу, а також самоорганізації гетерооксидних композитів;
- створення низки нових фоточутливих наногетероструктур, а також унікальних нанокомпозитів напівпровідників типу $A^{II}B^{VI}$, оксиду графену і відновленого оксиду графену для перетворення сонячної енергії в електричну; на цій основі виготовлення ефективних фотоелектрохімічних систем для отримання й акумулювання “сонячного” водню.
- електроаналітичне приладобудування та реалізація електрохімічних технологій при створенні чутливих елементів квантових сенсорів для моніторингу довкілля;
- залучення до розв’язання численних проблем оборонного комплексу України, зокрема рециклінгу і утилізації надлишкових та застарілих і небезпечних боеприпасів, підвищення потужності транспортних двигунів та зменшення емісії токсичних газових викидів ДВЗ, створення активних матеріалів каталітичних нейтралізаторів для облаштування фільтровентиляційних систем стаціонарних і мобільних автотранспортних і бронеоб’єктів і т.і.
- виключення з обігу токсичних для довкілля компонентів шляхом пошуку і застосування альтернативної заміни матеріалів покриттів і компонентів електролітів з «дружнім» ставленням до довкілля.

Таким чином, робота присвячена розв’язанню актуальних науково-практичних проблем, серед яких найвагомішими є теоретичні та прикладні аспекти електрохімічного формування та функціонування нових матеріалів і систем, а також з’ясування основних закономірностей їх утворення та визначенню факторів, які дозволяють цілеспрямовано впливати на наноструктуру, склад та комплекс функціональних властивостей. Отримані результати розширюють міждисциплінарні зв’язки електрохімії з нанонаукою і нанотехнологією в матеріалознавстві, енергетиці, електроніці, сенсоріці, токсикології та багатьох інших галузях

Висока публікаційна активність переконливо демонструє важливість досліджень електрохімічних методів формування функціональних матеріалів і систем та їх актуальність у міжнародному науковому співтоваристві. Крім наукової важливості досліджень, існує безліч економічних причин для розробки нових електродних матеріалів для батарей, суперконденсаторів і паливних елементів тощо. Сказане вище повністю підтверджує очевидну важливість і актуальність таких досліджень, а також стосується нових викликів в їх розвитку і вдосконаленні. Тому ми можемо з упевненістю прогнозувати довгостроковий розвиток цієї галузі і збільшення попиту досліджень в області електрохімічного функціонального матеріалознавства.

Мета роботи. Робота спрямована на розв'язання цілої ланки важливих науково-практичних проблем, що потребувало розробки узагальненого теоретичного підґрунтя для вдосконалення вже існуючих і створення нових електрохімічних технологій, що будуть відповідати революційним вимогам сьогодення та найближчого майбутнього - концепції керованого електрохімічного синтезу функціональних матеріалів і систем з прогнозованими властивостями, з'ясування механізмів їх утворення та виявлення взаємозв'язку між складом, структурними особливостями та властивостями.

Таким чином, спільна мета представленої роботи – розроблення теоретичних основ спрямованого синтезу та створення широкого спектру нових конкурентоздатних матеріалів і систем на основі встановлення структурно-функціональних закономірностей їх електрохімічного формування.

Основні напрямки досліджень даної роботи стосуються електрохімії, як безпосередньо метода синтезу нових матеріалів - шляхом їх формування (MEMS-технології, темплайтний синтез, наноелектрохімія) або електролізу, як методу формування функціонального/поліфункціонального шару/шарів на поверхні конструкції-носія, так і дослідження та дизайну електрохімічних властивостей отриманих матеріалів/покривів/плівки/наночасток для забезпечення кінцевому високотехнологічному виробу відповідного функціонального призначення, підвищення його конкурентоздатності.

Наукова новизна.

Вперше у світовому електрохімічному матеріалознавстві сформульовано загальні принципи вибору складу електролітів, умов електролізу для електрохімічного формування вибраних типів функціональних матеріалів. Проаналізовано та узагальнено основні кореляції між цими параметрами, технологічними характеристиками одержання електрохімічних матеріалів та їх функціональних властивостей та принципи проектування за результатами розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних технологій на підґрунті фундаментальних властивостей і атомно-молекулярних характеристик вихідних компонентів.

У представленому циклі досліджень на підставі систематичного розвитку теорії макрокінетики розряду-іонізації комплексних сполук, що ґрунтується на закономірностях впливу складу електроліту та режимів електролізу на різноманітні стадії складного процесу електрохімічного

синтезу (насамперед, на попередню та слідуєчу хімічні стадії, стадії розряду, масопереносу та електрокристалізації), сформульовані основні принципи утворення електрохімічно активних комплексів.

- Розроблено методологію електрохімічного синтезу функціональних, у тому числі каталітично-активних матеріалів, що базується на розвитку уявлень про вплив електрохімічної кінетики на структурочутливі властивості осадів і прогностичну можливість керування ними із залученням теорії електроактивних комплексів та гіпотези про кореляційний взаємозв'язок функціональних властивостей з фундаментальними кінетичними характеристиками, а саме із будовою та реакційною здатністю координаційних сполук металів в електроосадженні та електрокаталізі.

- Висунуто, теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено умови стійкого динамічного режиму процесу функціонального електроосадження металів. Показано, що стійкі коливання електрохімічного опору системи мінімальні за струму поляризації в області половини граничного струму і не залежать від природи комплексного іона. Встановлено, що саме за цих умов реалізується найбільш сприятлива енергетика росту граней кристалів для формування чітко визначеної структури металу й формуються покриття зі стабільним набором необхідних функціональних характеристик.

- Розроблено методологію ефективного високошвидкісного електрохімічного синтезу мультифункціональних (магнітних, корозійно-стійких і електрокаталітичних) щільних плівок наноструктурованих бінарних і тернарних сплавів M_1M_2 , M_1M_3 , $M_1M_2M_3$ (де M_1 - $3d^{6-8}$ метал підгрупи заліза: Fe, Co, Ni; M_2 - Mo, W; M_3 - Re), з різних типів комплексних водних електролітів з контрольованим складом і відтворюваною структурою. Такі сплави отримали назву «суперсплави» завдяки унікальному спектру цінних фізико-хімічних (корозійних, електрокаталітичних) та функціональних властивостей і призначені для роботи в екстремальних температурно-силових режимах при одночасному впливі агресивного середовища. Наявність ренію у сплаві до того ж одночасно підвищує його міцність і пластичність (так званий «ренієвий ефект»). Розвинені уявлення про процес сплавоутворення досліджених систем з точки зору створення стабільних d^{10} -електронних конфігурацій атомів Mo, W і Re за рахунок неспарених $3d$ -електронів металів групи заліза. Найбільш значущий стимулюючий вплив на електрохімічне виділення водню, як цільового конче затребуваного продукту, виявлено в разі, коли один з металів має електронну конфігурацію d^4-d^5 , а другий - d^6-d^8 .

- Запропоновано нові принципи і концепцію формування високоефективних селективних електрокаталізаторів з заданими властивостями для електрохімічних пристроїв перетворення енергії та інформації (ХДС, сенсорів, паливних елементів), що полягають у використанні біфункціонального електрокаталізу, який зумовлений дією різних за природою каталітичних центрів, включених в одну структуру, за певного просторового розташування один щодо одного: один центр повинен мати нуклеофільну, а другий електрофільну природу.

- В практику технічного електролізу впроваджено нові уявлення і парадигми формування покриттів багатокомпонентними сплавами і металоксидними композитами за рахунок контрольованого і керованого перебігу процесів в електрохімічних системах, а саме:

- Обґрунтовано новітні підходи інженерії поверхні до обробки високолегованих сплавів /алюмінію, титану/ при синтезі металоксидних композитів (МОК), за якою електроліз проводять в присутності лігандів, які утворюють комплекси з легуючими компонентами сплавів, що забезпечує одночасний перебіг двох парціальних реакцій: окиснення матриці сплаву з формуванням гомогенного оксидного покриття та іонізацію домішкових елементів з утворенням розчинних сполук.

- Гетерооксидні системи, як найефективніші за функціональними властивостями (мікротвердість, електро- і фотокаталітична активність, хімічний опір та ін.) синтезують плазмоелектролітним оксидуванням, що дозволяє в одному технологічному процесі гомогенізувати поверхню багатокомпонентних сплавів, створювати розвинену монооксидну матрицю металу-носія та інкорпорувати цільові допанти. Зокрема, при застосуванні таких теплозахисних каталітичних покривів в транспортних двигунах внутрішнього згоряння робочий процес перебігає в режимі внутрішньоциліндрового каталізу, що зменшує викиди оксидів азоту на 10% та оксидів вуглецю – до 18%, а витрати палива – до 4%.

- Запропоновано наносити МОК «металева матриця – нанорозмірний оксид алюмінію» шляхом диспергування товарного оксиду алюмінію в лужному середовищі з отриманням гідрозолу алюмінію, тобто реалізацією процесу «зверху – вниз», та наступним використанням гідрозолу для формування композитного електролітичного покриття за принципом «знизу - вгору».

- Варіативне формування покриттів багатокомпонентними сплавами або композитами реалізують на підставі гіпотези про інкорпорацію до складу металевої матриці оксидів металів проміжного ступеня окиснення, як інтермедіатів електродних реакцій, що утворюються в процесі електролізу, тому синтез МОК відбувається без введення в електроліт другої фази.

- Нанесення тернарних сплавів на основі металів родини феруму і тугоплавких металів (Mo, V, W, Re) є сукупністю спряжених реакцій за участю моно- і білігандних гетероядерних комплексів та ад-атомів водню і в умовах імпульсного електролізу формування покриття відбувається як електрохімічним відновленням впродовж імпульсу, так і ад-атомами гідрогену впродовж паузи, що дозволяє керувати повнотою відновлення оксидів, а відтак, складом і властивостями МОК варіюванням амплітудно-часових параметрів електролізу.

- Керування елементним, фазовим складом та морфологією МОК найбільш повно можна реалізовувати із застосуванням новітньої наукової концепції генезису металоксидних систем, яка ґрунтується на інверсії природи матриць металоксидних композитів та їх самоорганізації.

- Для створення наноламінатних покриттів активними діелектриками контрольованої товщини із спеціальними фізико-хімічними властивостями

застосовано інтегрування двох електрохімічних процесів: плазмоелектролітного оксидування та електрофоретичного осадження, що дозволяє в єдиному технологічному циклі формувати шаруваті покриття сегнетоелектриками і феромагнетиками.

- Вперше як показник каталітичної активності багатокомпонентних електрохімічних сплавів використано різницю енергій зв'язку „метал – елемент”, що дало змогу прогнозувати каталітичну активність покриттів в реакціях за участю вуглеводнів з використанням різниці енергій зв'язку „метал – гідроген” і „метал – карбон”.

- Як активний матеріал для фотокаталітичних перетворень застосовано гетерооксидні МОК складу $Ti/Ti_nO_m \cdot M_xO_y$ ($M = Zn, Zr, Cu$ та ін.), що проявляють синергетичні властивості та залежно від складу на порядок величини пришвидшують реакції перетворення техногенних емітентів порівняно з індивідуальними оксидними фотокаталізаторами.

- Встановлено закономірності синтезу високопровідних органічних матеріалів, так званих «синтетичних металів», діагностика та прогнозування властивостей яких застосовано для керованого синтезу цільових продуктів відповідно до потреб мікроелектроніки.

- Встановлено взаємозв'язок між головними параметрами електрохімічного відновлення металів й основними характеристиками синтезованих дисперсних матеріалів для створення наукових концепцій дизайну металевих і біметалевих наночастинок у колоїдних розчинах і наноструктурованих 2D і 3D металевих та біметалевих систем на поверхні, з електрокаталітичними (окиснення спиртів), та напівпровідниковими властивостями.

- Запропоновано електрохімічний синтез колоїдних розчинів наночастинок срібла; осадження наноструктур металів на металеву та кремнієву поверхні у середовищі органічних апротонних розчинників; встановлення каталітичної активності одержаних наноструктурованих матеріалів у відновленні CO_2 .

- Розроблено електрохімічний підхід для одержання функціональних плівок на основі електропровідних полімерів та нанорозмірних допантів для сенсорних масивів та встановлено, що використання електропровідних полімерів з різними механізмами допування редокс активних допантів обумовлює можливість їх додаткової специфічної взаємодії з молекулами органічних розчинників, що дозволяє створювати сенсорні масиви, здатні селективно розпізнавати пари органічних розчинників різної природи.

- Запропоновано механізм електрохімічного синтезу електропровідних полімерів з системою спряжених π -зв'язків на основі поліаніліну та його похідних, а також розроблено нові підходи щодо отримання їх (нано)композитів з частинками/дисперсіями металів, що характеризуються відтворюваними фізико-хімічними та функціональними властивостями. Показано перспективність застосування таких тонких полімерних/композитних плівок для модифікації електродів сенсорних пристроїв різної природи, як каталізаторів електрохімічних синтезів,

перспективних адсорбційних матеріалів для видалення йонів важких металів тощо.

- З'ясовано основні закономірності, вплив різноманітних чинників, запропоновано та уточнено механізми процесів за участю електрохімічно генерованих частинок у дублетному стані, що призводять до генерування електрохемілюмінісценції у водних та апротонних розчинах. Сформульовано умови використання електрохемілюмінісценції у електрохімічному препаративному синтезі.

- З метою пошуку нових перспективних матеріалів для нелінійної оптики та оптоелектроніки, твердотільних електролітів та іонообмінних мембран для хімічних джерел електричної енергії, проведено систематичні дослідження фазових рівноваг у потрійних та почетвірних системах на основі срібла. Показано, що неактиваційний твердофазний синтез деяких магнітних напівпровідників за умов потенціал-визначаючих електрохімічних процесів є перспективним методом отримання таких матеріалів за відносно низьких температур ($<600^{\circ}\text{C}$), що суттєво розширює перелік сполук та їх твердих розчинів – перспективних матеріалів для спінтроніки.

- Обґрунтовано новітній механохімічний підхід та показана можливість одержання різних функціональних наноструктурованих матеріалів, зокрема, електропровідних полімерів різних типів і гібридних нанокомпозитів на основі електропровідних полімерів та оксидів перехідних металів, перевагами яких, як матеріалів катодів літієвих акумуляторів, є відсутність в складі кобальту, ефективність синтезу без використання розчинника і відсутність пост-синтетичного очищення, рекордна для оксидів питома ємність, висока стабільність при тривалому циклуванні заряду-розряду в широкому інтервалі потенціалу, швидка твердотільна дифузія іонів літію; графенів з різним ступенем окиснення, допованих графенів, дихалькогенідів перехідних металів, нітридів бору та вуглецю, германану тощо, які характеризуються унікальним комплексом функціональних властивостей.

- Розроблена теорія фотостимульованого переносу заряду на напівпровідникових електродах, яка описує механізми протікання фотоелектрохімічних реакцій в залежності від параметрів напівпровідників, що задаються умовами синтезу та модифікування поверхні металевими та напівпровідниковими квантовими точками та створення фоточутливих гетеро- та наноструктур. Встановлено кореляцію між фото- та електрокаталітичною активністю і положенням енергетичних зон напівпровідникових електродів, щоб відображає загальну тенденцію у фото- та електрокаталітичних процесах. Синтезовано фоточутливі матеріали для фотоелектрохімічних систем отримання «сонячного» водню.

Практична значимість.

Створений авторами комплекс теорій процесів електроосадження металів дав змогу розробити та впровадити ефективні методи керування електрохімічними технологічними процесами та визначити головний напрямок науково-технічного прогресу у цій галузі в Україні. Розроблено та

впроваджено у промисловість держави ефективні екологічно чисті унікальні технології одержання функціональних матеріалів із заданими властивостями, способи рециклінгу та електровилучення металів вилучення металів із рудної та вторинної сировини електрохімічними методами.

За умов промислової реалізації запропонованих процесів і технологій доведено можливість цілеспрямованого і прогнозованого керування основними параметрами через: варіювання складу електрохімічних систем шляхом утворення ЕАК та ЕНАК для прискорення чи гальмування відповідних стадій електродних процесів, через зміну параметрів режиму електролізу для забезпечення умов динамічно стійкого формування осадів у вигляді покриттів/плівок або порошків, використання нестационарного імпульсного електролізу, а також через додавання відповідних ПАР, легуючих домішок, розчинних полімерів та інших компонентів електроліту.

На основі цих досліджень розроблений широкий спектр технологій для одержання матеріалів із наперед заданим рівнем функціональних властивостей, методи інтенсифікації процесу електролізу, створення екологічно безпечних технологій та утилізація та знешкодження токсичних відходів виробництва. Розроблені та впроваджені принципово нові безціаністі технології.

Розроблені “зелені” технології з перероблення вторинної сировини (брухту на основі міді та її сплавів, псевдосплавів WC-Ni, відпрацьованих мідь-цинкових каталізаторів, виробничих розчинів) за використання електрохімічних процесів (електролізу та електрохімічної цементації) з одержанням металів і порошків (міді, цинку, срібла), та неорганічних сполук (оксиду міді, мідного купоросу, паравольфрамату амонію).

Розроблено ефективні екологічно сумісні механохімічні методи одержання широкого ряду матеріалів. Проведено модифікацію кремнієвої поверхні наночастинками металів (срібла, золота, паладію) електролізом і гальванічним заміщенням з одержанням матеріалів для біосенсорів і кремнієвих нанониток. Створено низку нових вискоефективних функціональних наноматеріалів для різноманітних електрохімічних застосувань, серед яких: графени та пост-графенові 2D матеріали для створення вискоефективних електрокаталізаторів виділення водню з води та відновлення кисню, електродів суперконденсаторів, активних компонент електрохімічних сенсорів на біомолекули з близькими редокс потенціалами; колоїдні розчини наночастинок срібла – прекурсорів антибактеріальних препаратів; сенсорні масиви для селективного визначенні присутності в повітрі парів органічних розчинників. Розроблено фотоелектрохімічні системи, які за вартістю отриманого «сонячного» водню в 2,5 рази перевищили відомі системи з використанням твердотільних сонячних панелей та електролізеру.

Запропоновані теоретичні засади та розроблені технології, що об’єднані у даній роботі, мають видатне значення як для науки, так і для різних галузей промисловості України.

Автори не обмежилися теоретико-прикладними дослідженнями, створеними функціональними матеріалами, а й розробили різноманітні

конструкції електролізерів, вбудованих модулів та програмованих джерел струму для створення гнучких технологій та автоматичних ліній.

На основі розроблених наукових підходів створені нові функціональні матеріали: електро- і фотокаталізатори, гальванічні покриття металами, сплавами, оксидами та композитами, які за фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями перевищують відомі світові аналоги.

Представлена робота виконана на сучасному науковому обладнанні з використанням новітніх підходів до організації досліджень, в тому числі їх частина була проведена у співпраці з відомими фахівцями провідних закордонних університетів та наукових центрів.

Надано більше 40 актів випробувань та впроваджень результатів роботи «Електрохімія функціональних матеріалів і систем» на багатьох українських і закордонних (Республіка Білорусь) промислових підприємствах. Наукові результати впроваджено у освітній процес різних ЗВО МОН України.

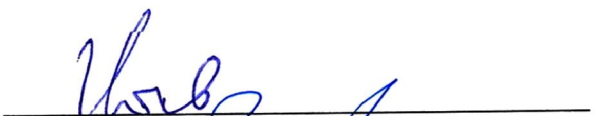
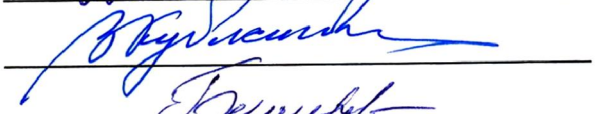
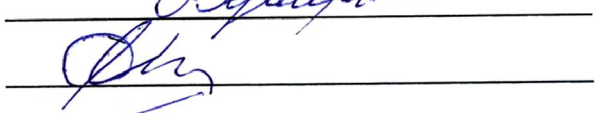
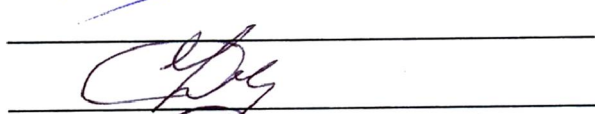



Публікації. Колективна робота включає 700 публікацій, серед них 30 монографій (7 – видані за кордоном) та 39 розділів монографій (30 - видані за кордоном), 2 підручники і 34 навчальних посібники (5 - англійські), 500 статей у фахових виданнях (350 – у зарубіжних виданнях).

Загальна кількість посилань на публікації авторів, що представлені в роботі, згідно з даними наукометричної бази Web of Science складає 1856, h-індекс (індекс Гірша за роботою) дорівнює 21, а i10-індекс становить 52; згідно з даними наукометричної бази Scopus: 2185 / 22 / 71, відповідно; згідно з базою даних Google Scholar: 4903 / 33 / 148.

Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 33 діючими патентами (з них 7 – патенти Казахстану, Китаю, США).

За даною тематикою захищено 8 докторських та 47 кандидатських дисертацій.

Автори:

Колбасов Г.Я.	
Кублановський В.С.	
Берсірова О.Л.	
Сахненко М.Д.	
Ведь М.В.	
Кунтий О.І.	
Решетняк О.В.	
Посудієвський О.Ю.	