Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Наукова робота на здобуття Премії Президента України для молодих вчених за 2022 рік

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МІКРО- І НАНОСТРУКТУРОВАНІ БАГАТОШАРОВІ МАТЕРІАЛИ

МАЙЗЕЛІС Антоніна Олександрівна – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри технічної електрохімії НТУ «ХПІ»

ПІНЧУК Наталія Володимирівна – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник кафедри матеріалознавства НТУ «ХПІ»

ВОЛОЩУК Валентина Василівна – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХПІ»

2022 р.

Актуальність, мета, об'єкт

Актуальність теми

Для виходу промисловості України на сучасний світовий рівень, що відповідає шостому технологічному устрою, необхідним є розвиток технологій одержання нано- та мікроструктурованих матеріалів з керованими фізико-хімічними властивостями, які знижують ресурсоємність при виробництві та експлуатації матеріалів. Для вирішення сучасних матеріалознавчих завдань необхідні матеріали з високими експлуатаційними характеристиками. Захисні покриття та матеріали з підвищеними міцнісними характеристиками в широкому інтервалі робочих температур дозволяють істотно розширити сферу застосування виробів і наблизитись до розв'язання цього питання.

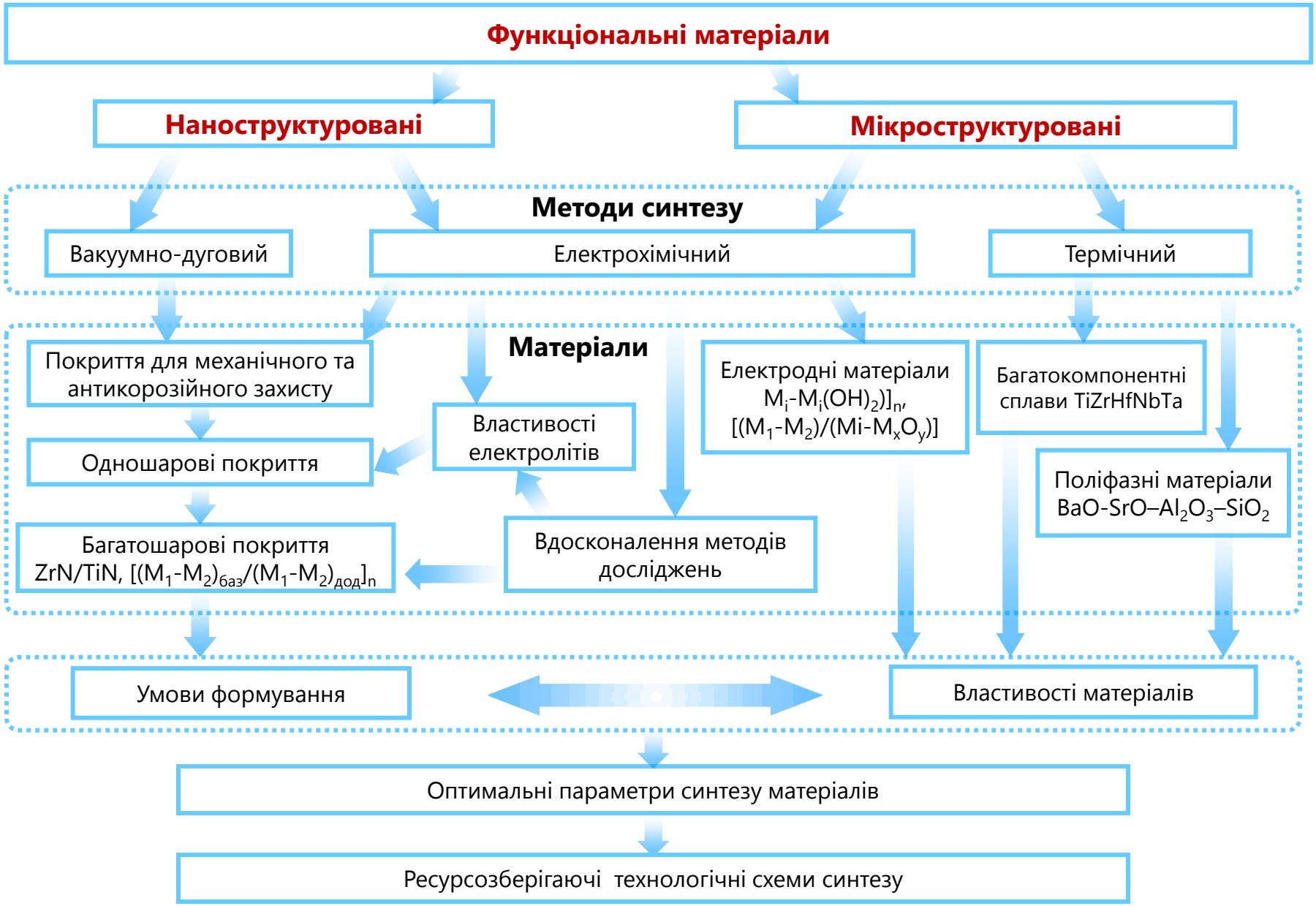
«Структурна інженерія», як одна із складових частин цієї роботи, дозволяє більш точно оцінювати і варіювати властивості матеріалів на мікро- та макрорівнях, моделювати та створювати нові матеріали із заданими функціональними характеристиками. В залежності від складу та мікроструктури вони можуть мати набір заданих властивостей, таких як корозійна стійкість, висока міцність, зносостійкість, пластичність, висока твердість тощо. Новий клас матеріалів має більш високу міцність і термодинамічну стійкість в порівнянні з традиційними багатокомпонентними багатофазними сплавами.

Обсяги світового ринку в напрямку створення нано- та мікроструктурованих матеріалів оцінюються загалом близько 90 млрд. дол. США. Для прикладу світовий ринок виробництва гальванічних покриттів оцінюється у більше ніж 6 млрд. дол. США із сукупним середньорічним темпом зростання більше 4%, а виробництво електрокаталітичних матеріалів, наприклад, для паливних елементів, оцінюється у 33 млрд. дол. США з сукупним середньорічним темпом зростання у 15%. Обсяг світового ринку функціональних керамічних матеріалів становить понад 50 млрд. дол., при цьому основна частка використання електротехнічної кераміки припадає на країни з високорозвиненою економікою. Перспективність налагодження виробництва конкурентоздатних виробів міжнародного рівня в зазначених галузях в Україні зумовлює поєднання доступності сировинних компонентів і їх невисокої вартості з високим кваліфікаційним рівнем вітчизняних науковців. Зниження матеріало- та енергоємності виробництва при таких об'ємах є суттєвим стимулом для розвитку більш ефективних технологій та створення керованих функціональних матеріалів. Найбільш поширеними методами формування мікро- та наноструктурованих поверхонь та поліфазних матеріалів є термічний, вакуумно-дуговий та електрохімічний. Однак у літературі практично відсутня інформація про фазовий склад тонких шарів сплавів захисних покриттів і про каталітично активні покриття з шарами різного складу, що періодично чергуються і формуються зазначеними методами. Тому формування нанорозмірних покриттів, мікро- та наноструктурованих поверхонь, що забезпечують задані функціональні властивості є важливою науково-практичною задачею сучасного матеріалознавства.

Мета дослідження: Розробка фізичних і електрохімічних способів формування мікро- і наноструктурованих матеріалів з підвищеними функціональними властивостями.

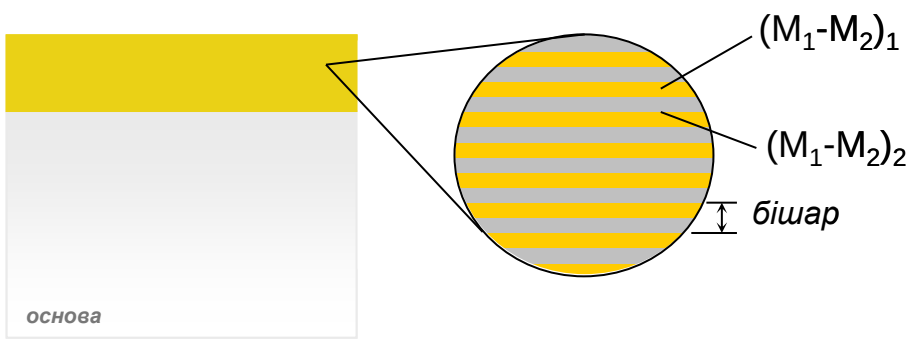
Об'єкт досліджень: Закономірності утворення мікро- та наноструктурованих одно- та поліфазних матеріалів на основі сполук нітридів, гідроксидів і оксидів та їх функціональні властивості.

Структура роботи



НАНОСТРУКТУРОВАНІ БАГАТОШАРОВІ ПОКРИТТЯ

$[(M_1\text{-}M_2)_{баз}/(M_1\text{-}M_2)_{дод}]_n$ ТА ZrN/TiN



Товщина шарів: ~ 10-100 нм

Кількість бішарів (~100…400)

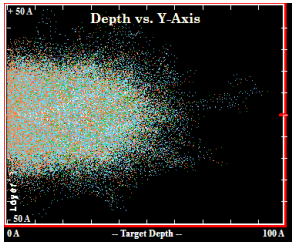
Розроблено у роботі:

- $[(Cu\text{-}Zn)_{баз}/(Cu\text{-}Zn)_{дод}]_n$
- $[(Cu\text{-}Sn)_{баз}/(Cu\text{-}Sn)_{дод}]_n$
- $[(Zn\text{-}Ni)_{баз}/(Zn\text{-}Ni)_{дод}]_n$
- $[ZrN/TiN]_n$

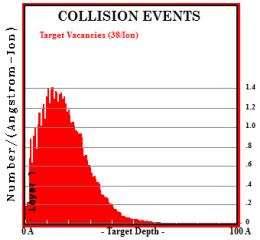
Багатошарові вакуумно-дугові покриття на основі TiN/ZrN

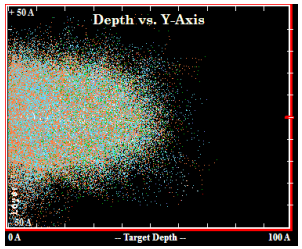
Результати моделювання при високоенергетичному бомбардуванні іонами (*U*= -2000 В, 1000 ітерацій)

Глибина проникнення іонів (h, Å) *Кількість вакансій (c)*

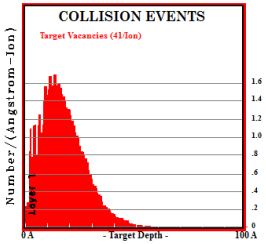


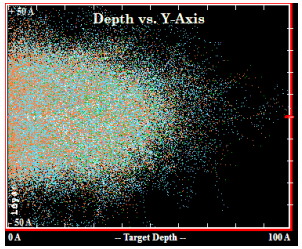
«Ti-TiN»



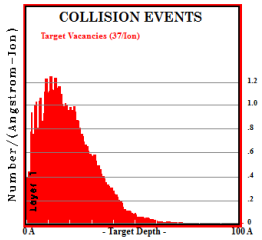


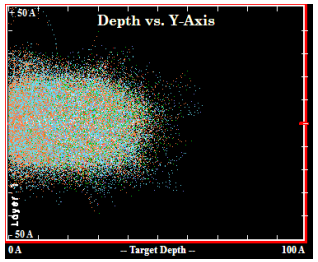
«Zr-ZrN»



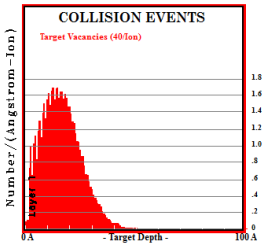


«Ti-ZrN»

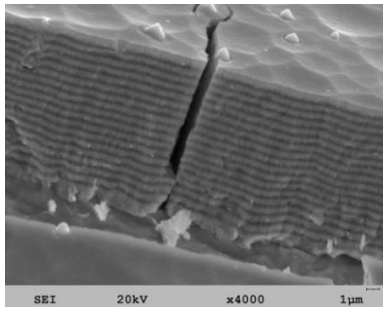




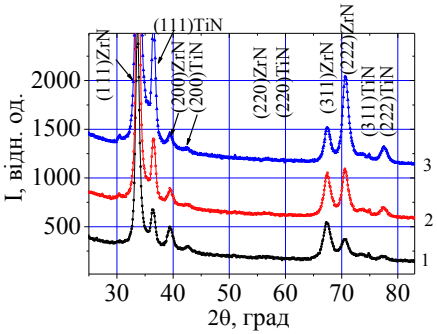
«Zr-TiN»



Мікроструктура зламу багатошарового покриття TiN/ZrN

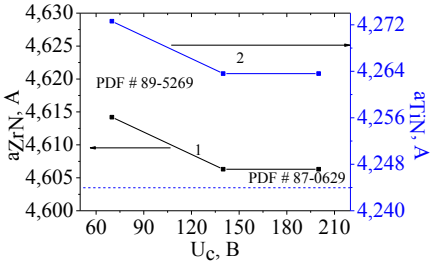


Ділянки дифракційних спектрів від покриттів TiN/ZrN



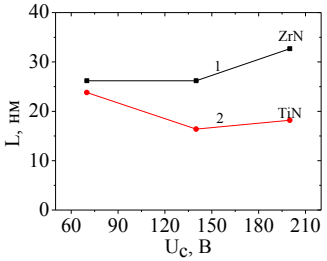
кількістю бішарів 162 (p_N = 0,4 Па)
U_c: *1* - -70 В, *2* - -140 В, *3* - -200 В

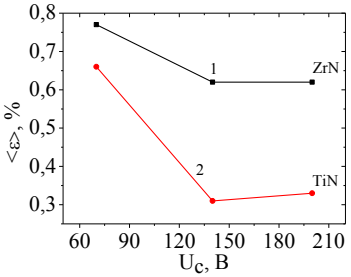
Залежність зміни періоду решітки (p_N = 0,4 Па)



1 – $a_{0\ ZrN}$, *2* – $a_{0\ TiN}$

Зміна субструктурних характеристикTiN/ZrN від U_c (p_N = 0,4 Па)

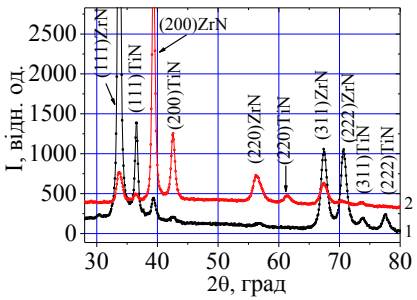




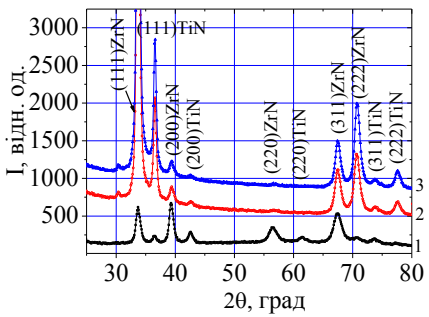
Особливості формування багатошарових покриттів TiN/ZrN в залежності від імпульсного потенціалу зміщення

Ділянки дифракційних спектрів

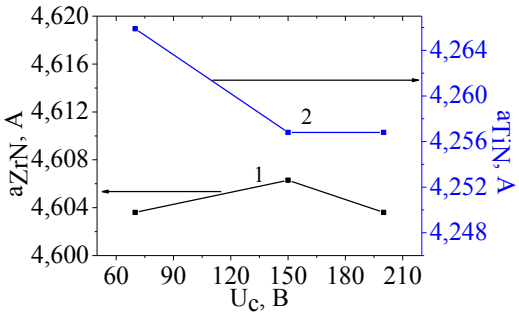
U_c = -30 В, p_N = 0,4 Па, k=134



p_N = 0,4 Па, k=162
U_i = -2000 В (τ=7 мкс)



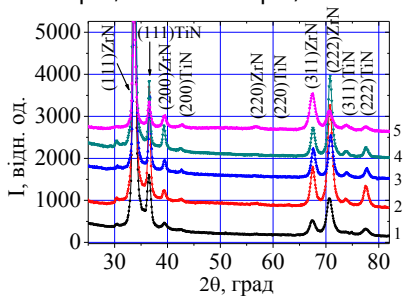
Зміни періодів решітки від U_c



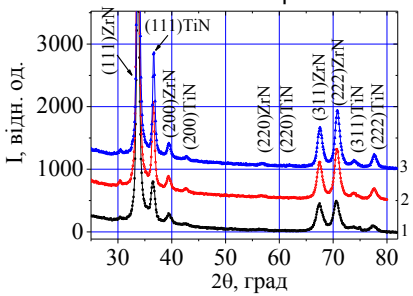
U_i= -2000 В,
τ=7 мкс,
p_N = 0,4 Па:
1 – $a_{0\ ZrN}$, 2 – $a_{0\ TiN}$

Вплив кількості бішарів (k) в багатошарових нанопокриттях TiN/ZrN

U_c= -200 В, p_N = 0,4 Па
k: 1 – 267 бішарів, 2 – 180 бішарів,
3 – 67 бішарів, 4 - 18 бішарів, 5 - 12 бішарів

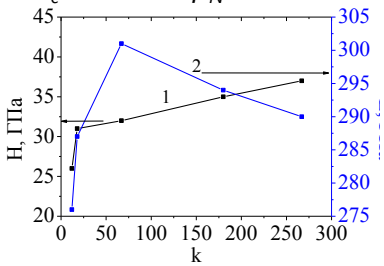


U_c = -140 В, p_N = 0,4 Па
k: 1 - 267 бішарів, 2 -134 бішари,
3 - 67 бішарів

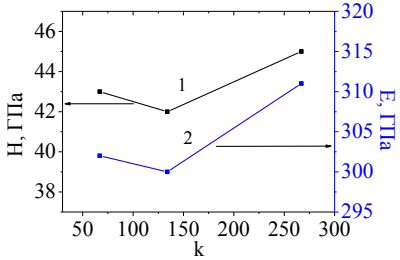


Твердість та модуль пружності багатошарових покриттів TiN/ZrN

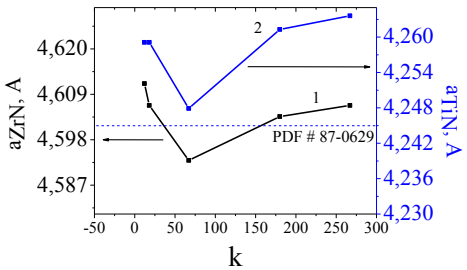
U_c = -200 В, p_N = 0,4 Па

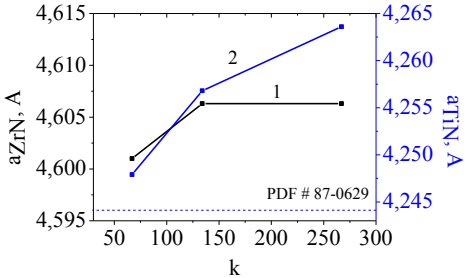


U_c = -140 В, p_N = 0,4 Па



Період кристалічної решітки





k=267, p_N=0,66 Па, U_i= -2000 В (τ=7 мкс)

U_c, В	H, ГПа	E, ГПа
(-5….-8)	26	270
20	20	215
230	44	400

Нелінійна поляризація за експериментально заданими даними в аналізі контактного обміну металів в електролітах

Аналітичний метод Донченко-Антропова*

Запропонований поточковий метод**

Поляризаційні залежності $j_k(E)$ та $j_a(E)$

+

Хронопотенціограма $E_{ст}(t)$

Одноступеневий метод
$v = const$

Багатоступеневий метод
$V_1 = \Delta E_{ст1} \dots v_n = \Delta E_{ст\,n}$

Метод НПЗД***
$v = E_{ст}(t)$

Швидкість повної взаємодії

Параметри кінетики гальванічного заміщення

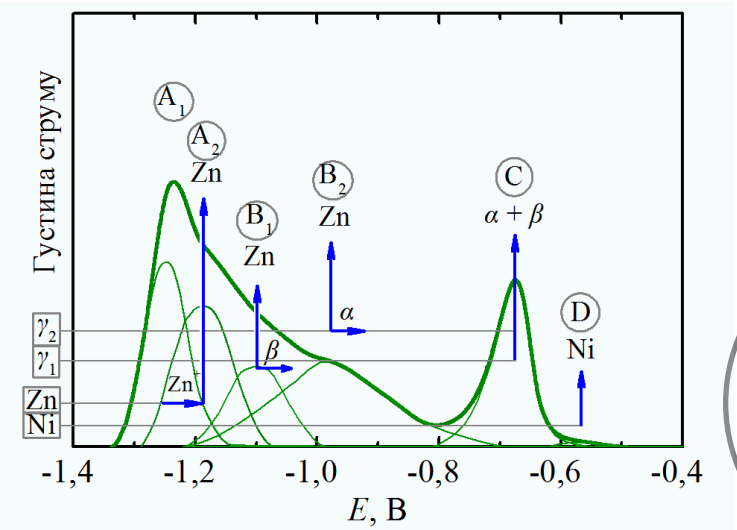
MTech
Measuring Technologies

* - рішення системи рівнянь поляризаційних залежностей

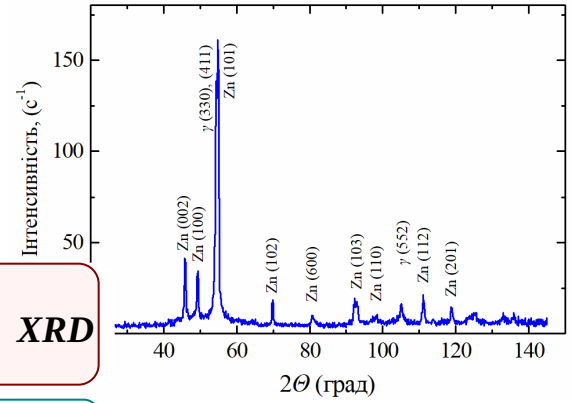
** - комп'ютерний аналіз масиву координат вихідних залежностей

*** - нелінійна поляризація за заданими даними

Експрес-аналіз складу тонких плівок сплавів методом стрипінг-вольтамперометрії



Електроліт: 0,5 моль/дм³ Gly
0,5 моль/дм³ NH_4Cl; pH10,5
$Q_a \cdot v/S$ = 1,9 Кл·мВ/(см²·с)



ВС, %

Фазовий склад:
γ-фази (структури γ_1, γ_2),
$Ni_{(вільн)}$, $Zn_{(вільн)}$; ↔ ***XRD***

Елементний склад, %:
Ni(заг), Zn(заг), ↔ ***XRF***

вміст α- і β-фаз у залишку після розчинення Zn

За даними XRD: фази Zn і γ.
За даними XRF:
11,6 ± 0,15 мас. % Ni

$$Q_{Zn(вільн.)} = Q_{A1} + Q_{A2} \quad ; \quad Q_{Ni(вільн.)} = Q_D$$

$$Q_i = Q_{p(i)} \Big/ \left(1 - \frac{n_\gamma}{n_j}\right) \rightarrow Q_{\gamma 1}, Q_{\gamma 2}$$

$$Q_{(i \to j)} = \frac{Q_{Ni(i)}}{n_j} \rightarrow Q_{(\gamma 1 \to \beta)}, Q_{(\gamma 2 \to \alpha)}$$

$$n_C = \sum\left(Q_{(i \to j)} \cdot n_j\right) \Big/ \sum Q_{(i \to j)}$$

n – ат. % Ni у фазі
i = γ1, γ2
j = α, β

За піками: $\sum Q_p = Q$

За залишком осаду: $\sum Q_{(i \to j)} = Q_C$

За співвідношенням α/β: $\sum Q_{Ni(i)} = n_C \cdot Q_C$

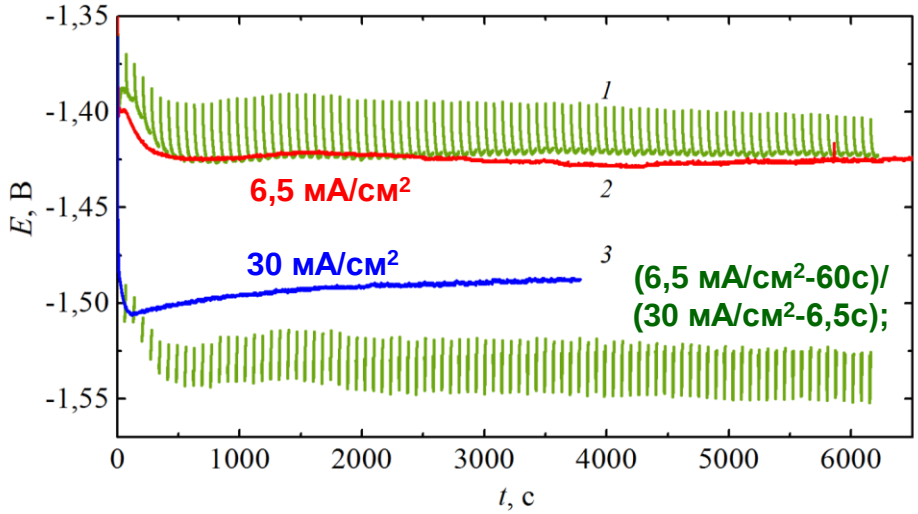
За фазовим складом:

$$Q_{Zn(вільн.)} + \sum Q_i + Q_{Ni(вільн.)} = Q$$

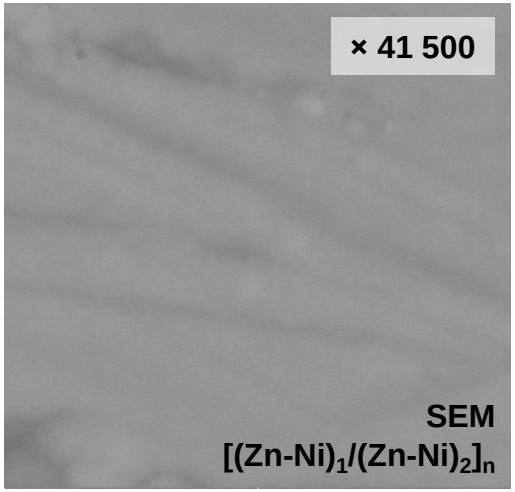
За елементним складом: $Q_{Ni} + Q_{Zn} = Q$

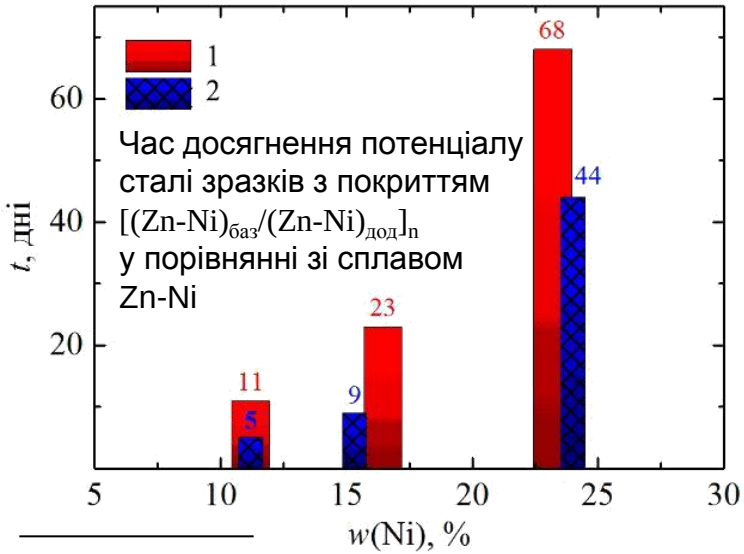
Maizelis A. Quantitative Analysis of Chemical and Phase Composition of Zn−Ni Alloy Coating by Potentiodynamic Stripping / A. Maizelis, Z. Kolupaieva // Electroanalysis. – 2020. – V. 11. https://doi.org/10.1002/elan.202060195

Властивості покриттів $[(Zn\text{-}Ni)_{баз}/(Zn\text{-}Ni)_{дод}]_n$

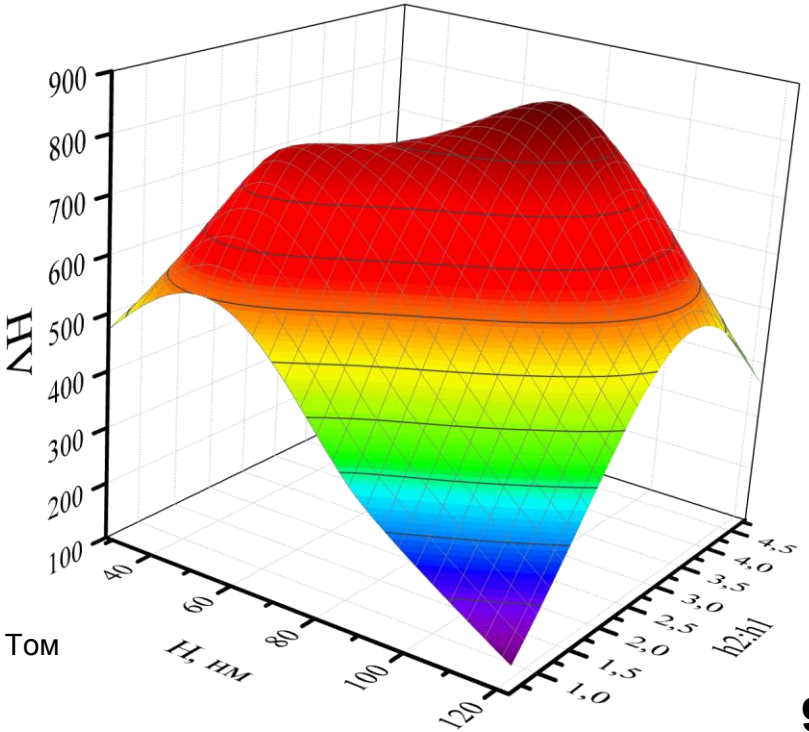


Хроно-потенціограми осадження покриттів з електроліту «1Zn2Ni»



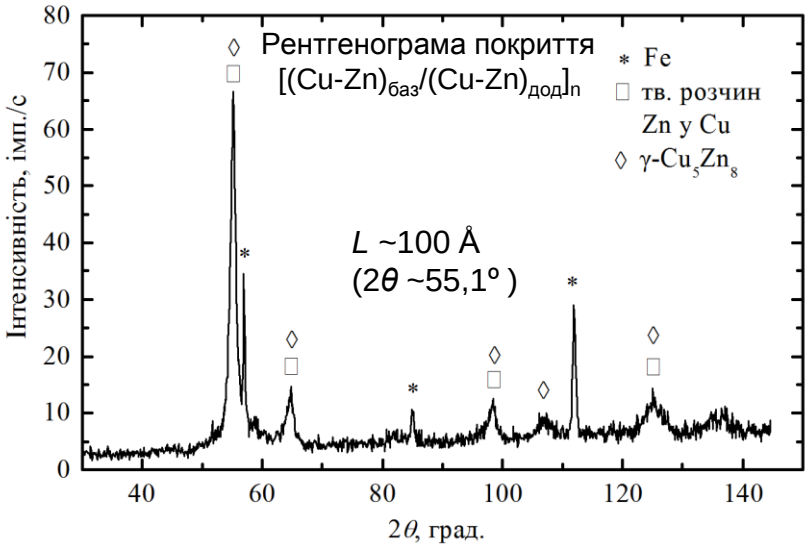


Залежність мікротвердості від **товщини бішарів** та **співвідношення товщин шарів** $(Zn\text{-}Ni)_1$ та $(Zn\text{-}Ni)_2$

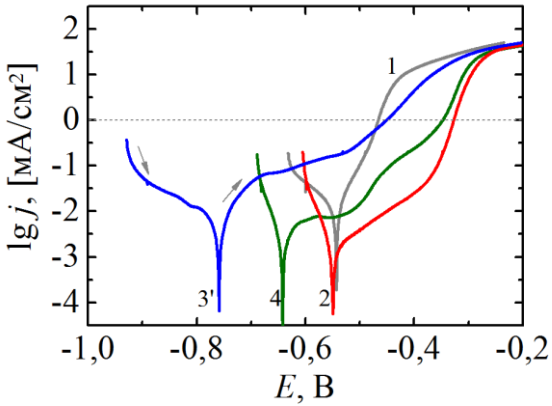


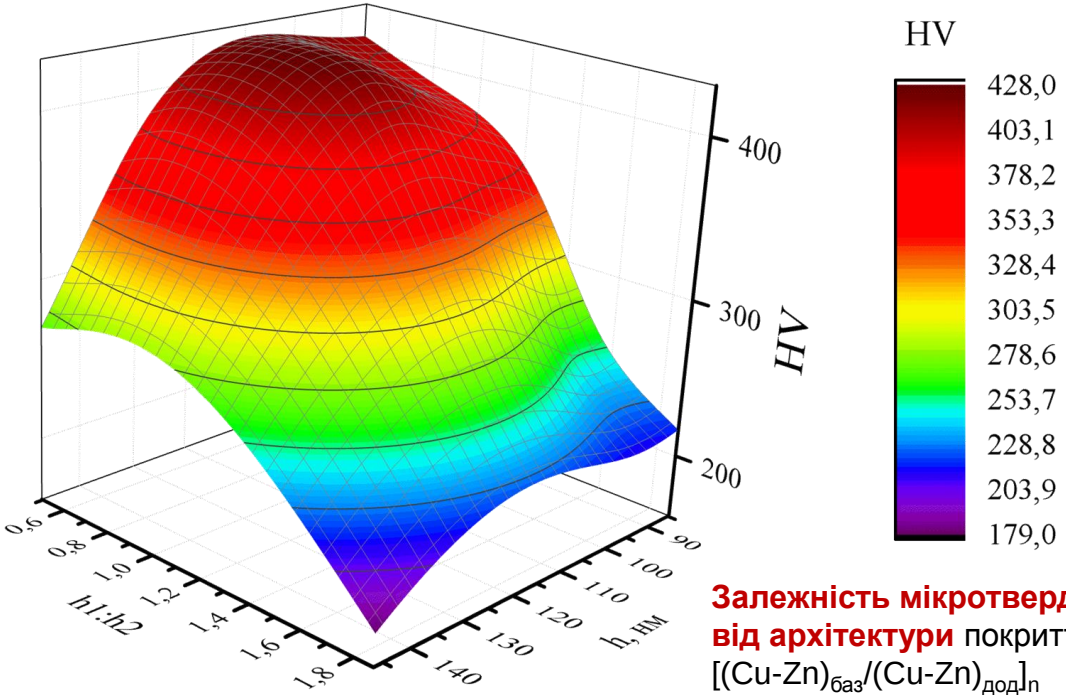
- Пат. на кор. мод. № 140475.
- Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2019. – Том 30 (69). – № 4, Ч. 2 – С. 61–66.
- Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2020. – № 13. – С. 11-16.

Властивості покриттів $[(Cu\text{-}Zn)_{баз}/(Cu\text{-}Zn)_{дод}]_n$



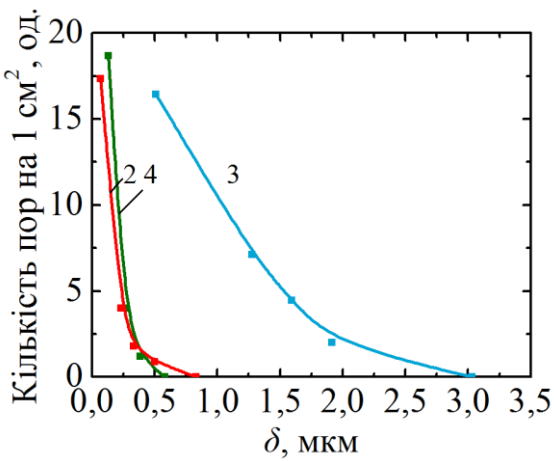
Корозійні діаграми **сталі (1),** **базового** (2), **додаткового** (3) та **мультишарового** (4) покриттів





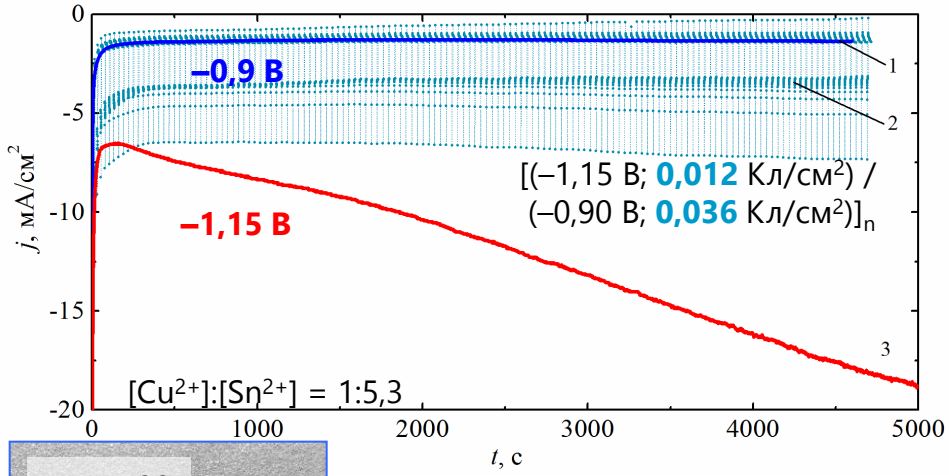
Залежність мікротвердості від архітектури покриття $[(Cu\text{-}Zn)_{баз}/(Cu\text{-}Zn)_{дод}]_n$

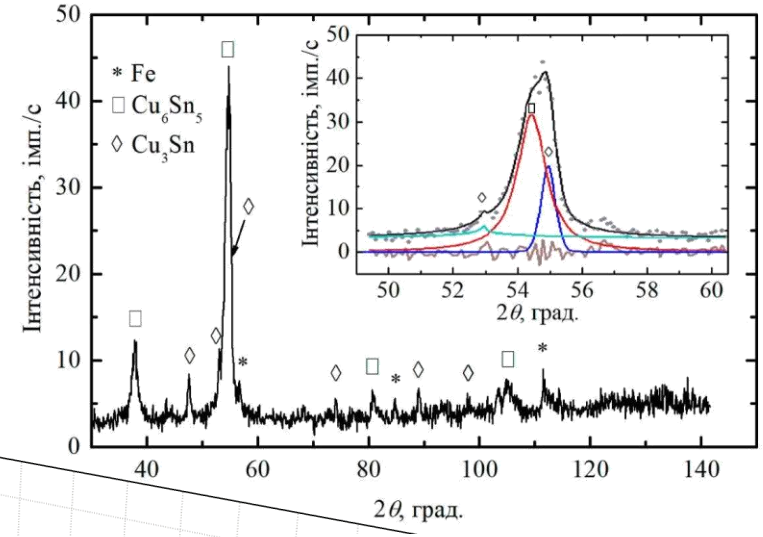
Пористість **базового** (3), **додаткового** (2) і **мультишарового** покриттів

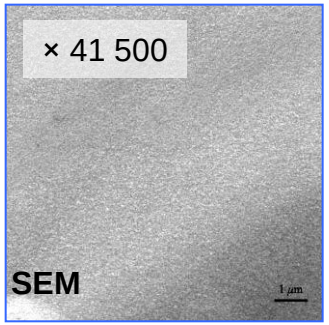


Пат. на кор. мод. № 143138.

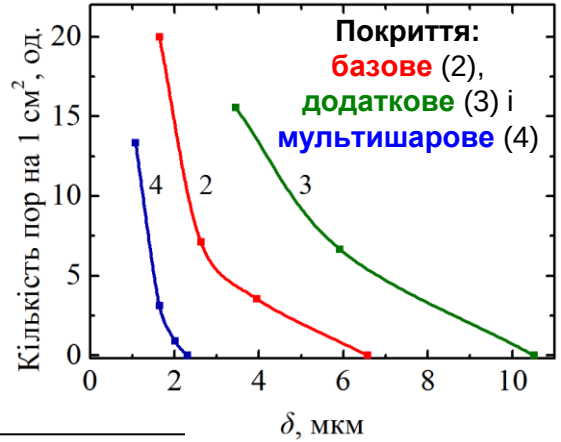
Властивості покритів $[(Cu\text{-}Sn)_{баз}/(Cu\text{-}Sn)_{дод}]_n$

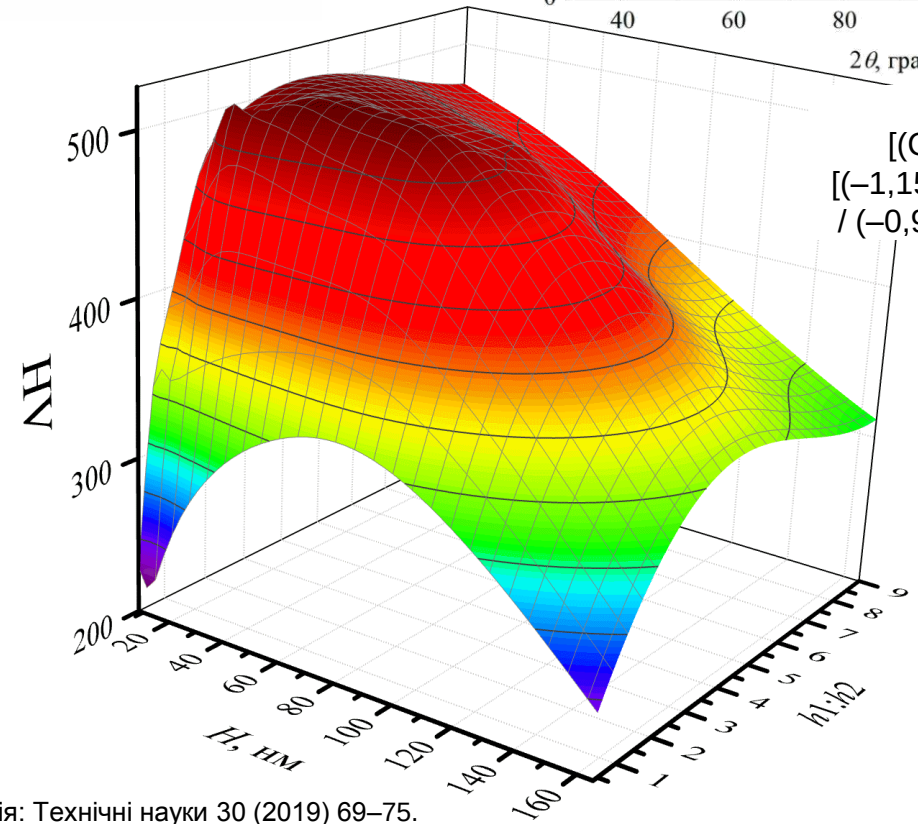






Пористість покриттів в залежності від товщини





XRD покриття $[(Cu\text{-}Sn)_{баз}/(Cu\text{-}Sn)_{дод}]_n$, [(–1,15 В до 0,017 Кл/см²) / / (–0,9 В до 0,034 Кл/см²)]n

Залежність **мікротвердості** покриттів $(Cu\text{-}Sn)_1/(Cu\text{-}Sn)_2$ від **товщини бішару** *H* і співвідношення **товщин складових шарів** h_1/h_2

- Пат. на кор. мод. № 140474;
- Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки 30 (2019) 69–75.

МІКРОСТРУКТУРОВАНІ МАТЕРІАЛИ

- **Каталітично активні багатошарові електродні матеріали:**

  $[(Cu\text{-}Ni)/(M_i\text{-}M_i(OH)_2]_n$

  $[(Zn\text{-}Ni\text{-}Cu)/(M_i\text{-}M_i(OH)_2)]_n$

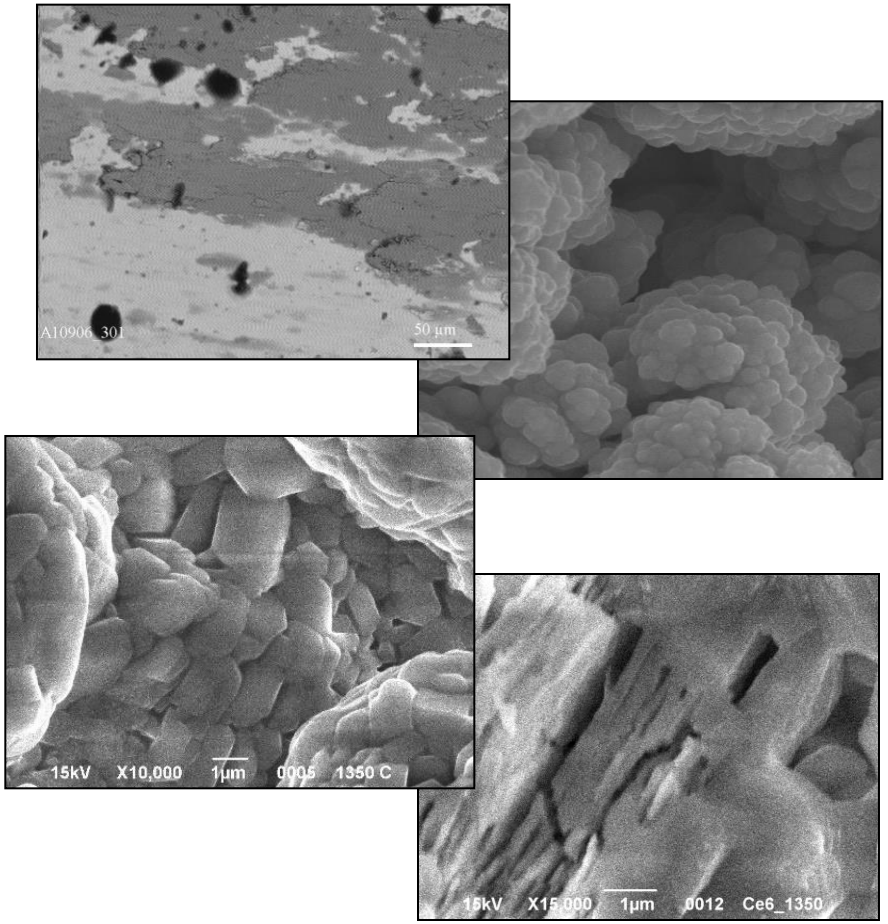
  $[(Sn\text{-}Sb)/M_i\text{-}M_i(OH)_x)]_n$

- **Багатокомпонентний високоентропійний сплав**

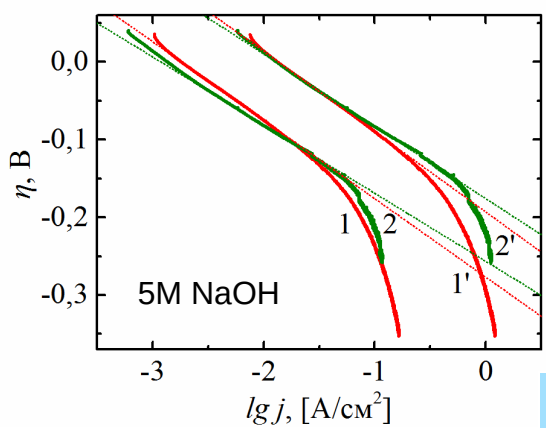
  $Ti_{30}Zr_{25}Hf_{15}Nb_{20}Ta_{10}$

- **Поліфазні матеріали**

  $BaO\text{-}SrO\text{–}Al_2O_3\text{–}SiO_2$



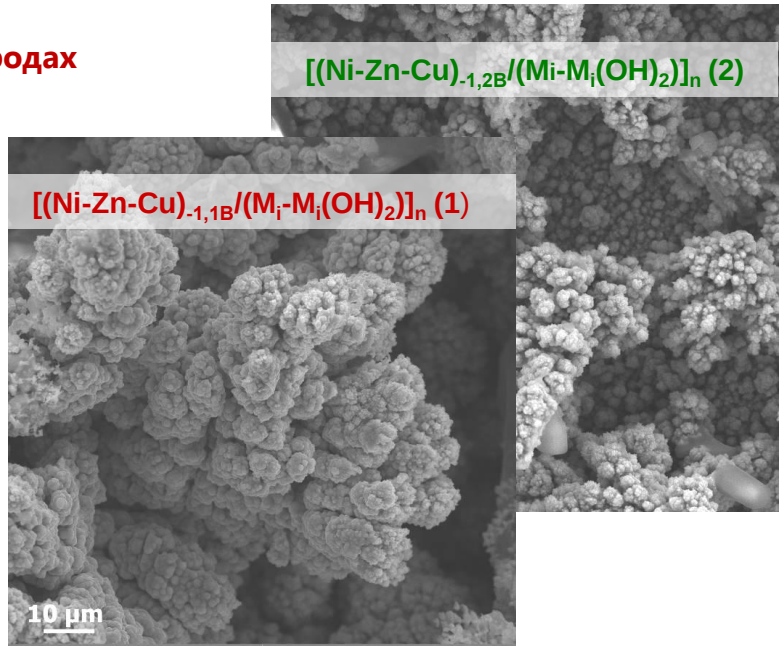
Каталітично активні електродні мультишарові матеріали



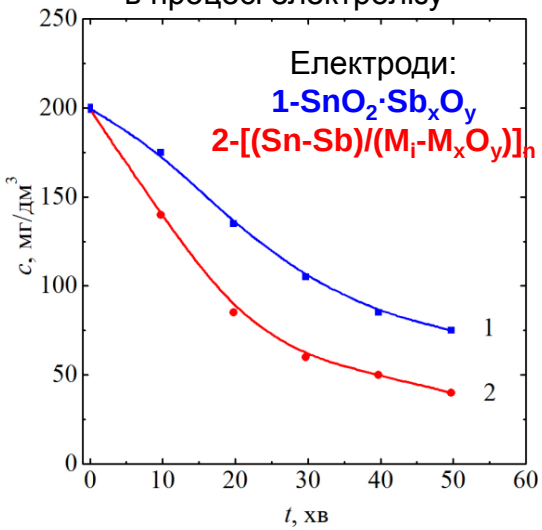
Виділення водню на $[(Ni\text{-}Zn\text{-}Cu)/(M_i\text{-}M_i(OH)_2)]_n$ електродах

Поляризаційні залежності у координатах Тафеля.
* з компенсацією IR
* густина струму вказана на реальну (1,2) та геометричну (1',2') площу

Покриття	$S_{геом.}$ см^2	$S_{реальн.}$ см^2
$[(Ni\text{-}Zn\text{-}Cu)_{-1,1В}/(M_i\text{-}M_i(OH)_2)]_n$	0,25	1,83
$[(Ni\text{-}Zn\text{-}Cu)_{-1,2В}/(M_i\text{-}M_i(OH)_2)]_n$	0,34	3,.27

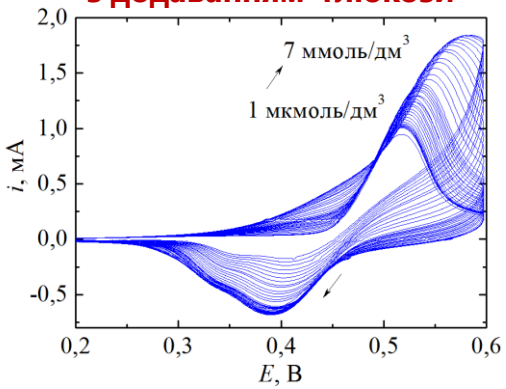


Зміна вмісту фенолу в процесі електролізу

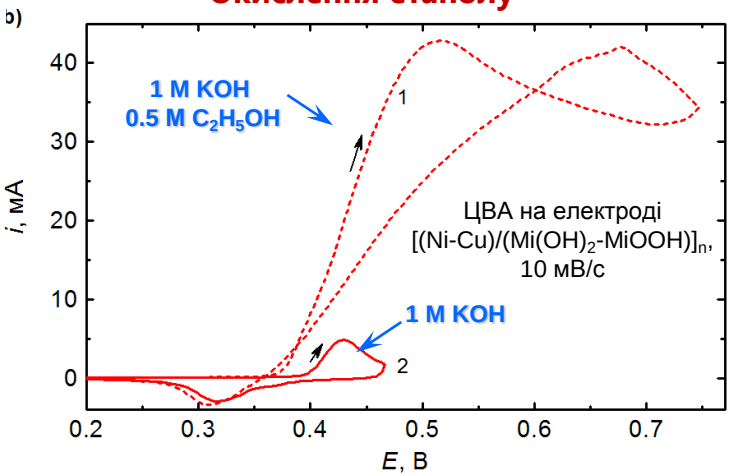


ЦВА (10 мВ/с) на електроді $(Ni\text{-}Cu)/(M_i(OH)_2\text{-}M_iOOH)$ у 0,1 моль/дм^3 КОН

з додаванням глюкози

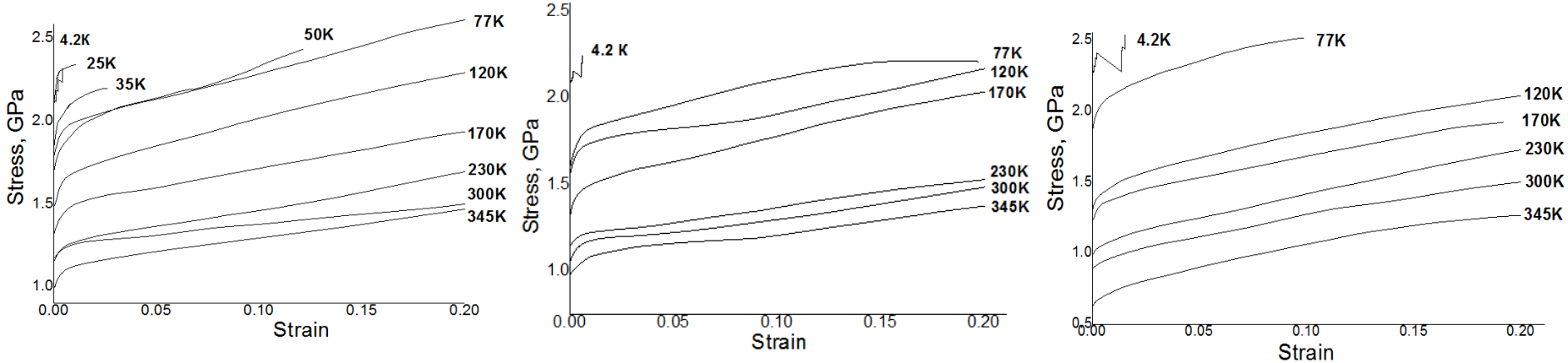


Окислення етанолу



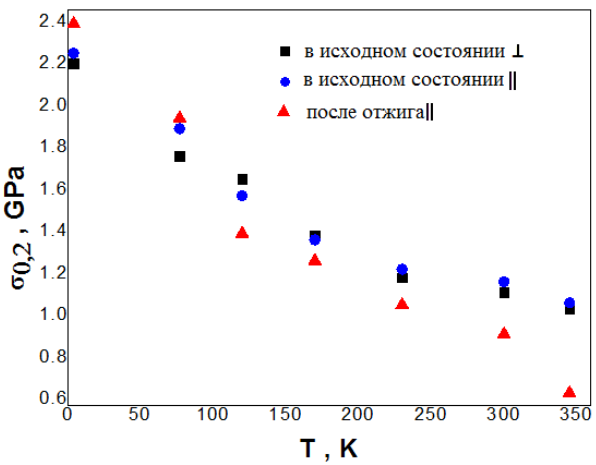
- Патент на винахід № 110258.
- Nanoscale Research Letters, 2017, V.12, 119.
- Materials Today: Proceedings, 2019, 6, 227–231.
- Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, 97–107.
- Springer Proceedings in Physics / O. Fesenko, L. Yatsenko. Switzerland, 2019, Chapter 4, P. 59-68.

Дослідження низькотемпературних механічних властивостей багатокомпонентного сплаву $Ti_{30}Zr_{25}Hf_{15}Nb_{20}Ta_{10}$

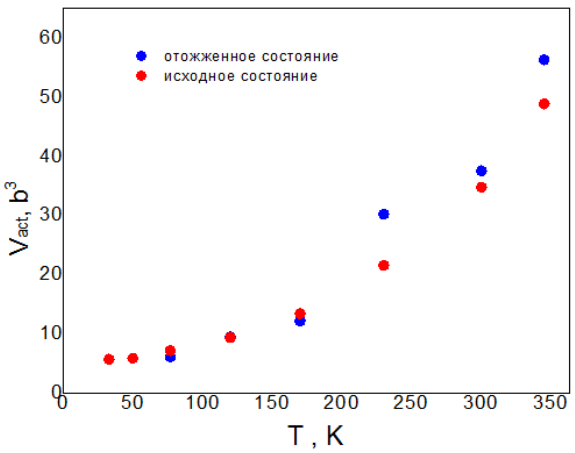


а) б) в)

Типові деформаційні криві за різних температур для мікроструктурованих зразків у вихідному стані з віссю стиснення вздовж (а) та поперек (б) напряму прокатки та після відпалу вздовж напрямку прокатки (в)



T, K	*l* , нм
345	14,2
300	10,2
230	6,2
170	3,9
120	2,7
77	2,0
50	1,7

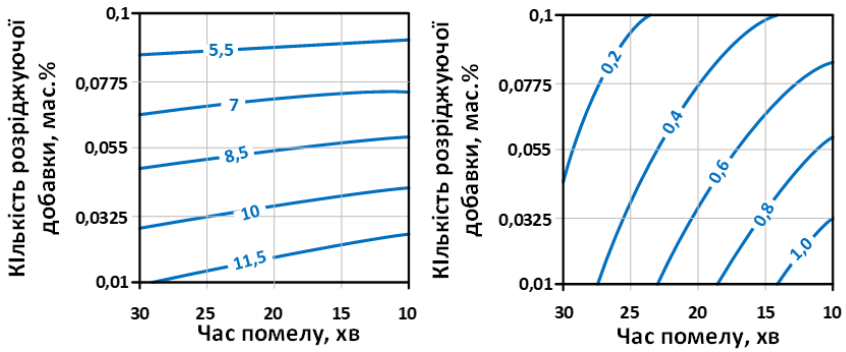


Температурні залежності межі плинності ($\sigma_{0,2}$), активаційного об'єму (*V*) та відстані між точками закріплення дислокацій (*l*) у дослідних зразках.

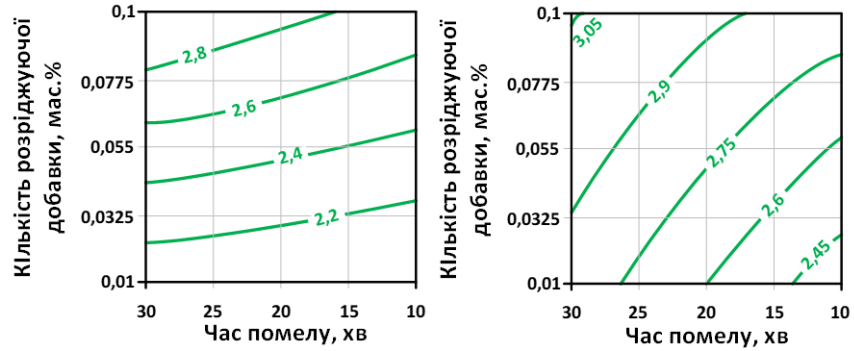
* Mechanical properties and thermally activated plasticity of the $Ti_{30}Zr_{25}Hf_{15}Nb_{20}Ta_{10}$ high entropy alloy at temperatures 4.2–350 K/ Podolskiy A.V.,Tabachnikova E.D., Voloschuk V.V., Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. // Materials Science and Engineering A, 2018, Volume 710, Pages 136–141.

**Low temperature mechanical properties of the $Ti_{30}Zr_{25}Hf_{15}Nb_{20}Ta_{10}$ high entropy alloy / Voloschuk V.V., Tabachnikova E.D., Podolskiy O.V., Gorban V.F.// VII International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” ICYS LTP 2016, June 6 – 10, Kharkiv, 2016. P. 177.

Оптимізація технологічних параметрів отримання мікроструктурованих функціональних матеріалів на основі системи $BaO – SrO – Al_2O_3 – SiO_2$



Залежність водопоглинання зразків випалених при температурах 1250 та 1350 °С від технологічних параметрів



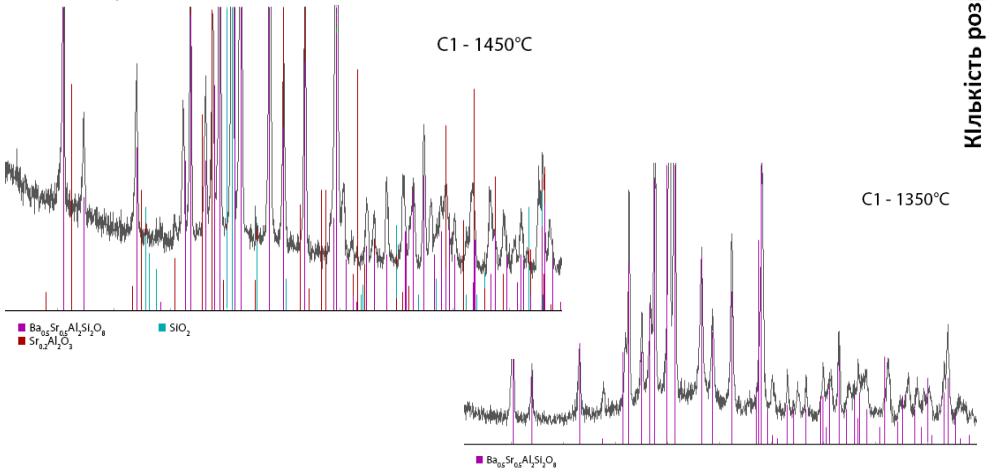
Залежність уявної густини зразків випалених при температурах 1250 та 1350 °С від технологічних параметрів

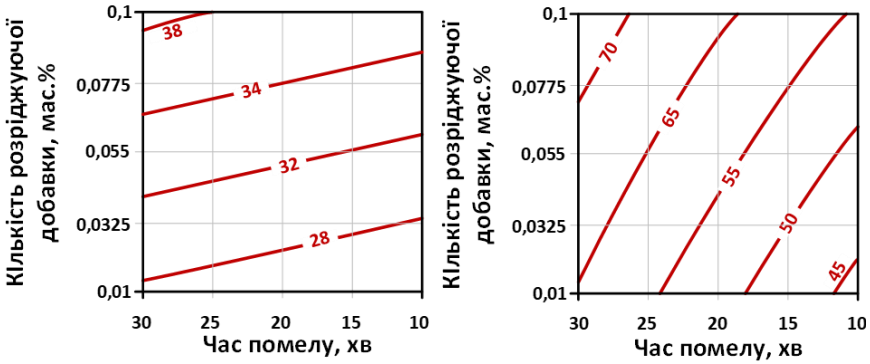
Залежності з кодованими факторами для різних серій мають вигляд:

$W,\% = 4{,}49 - 1{,}35 \cdot x - 0{,}3 \cdot y - 3{,}9 \cdot z + 0{,}042 \cdot x \cdot y + 1{,}071 \cdot x \cdot z - 0{,}035 \cdot y \cdot z + 0{,}079 \cdot x \cdot y \cdot z$

ρ, г/см^3 = $2{,}777 + 0{,}121 \cdot x + 0{,}124 \cdot y + 0{,}16 \cdot z + 0{,}015 \cdot y \cdot z + 0{,}024 \cdot x \cdot y \cdot z$

$\sigma_{зг}$, МПа$=45{,}279 + 4{,}908 \cdot x + 3{,}947 \cdot y + 11{,}426 \cdot z - 0{,}044 \cdot x \cdot y - 0{,}547 \cdot x \cdot z + 2{,}81 \cdot y \cdot z + 0{,}071 \cdot x \cdot y \cdot z$

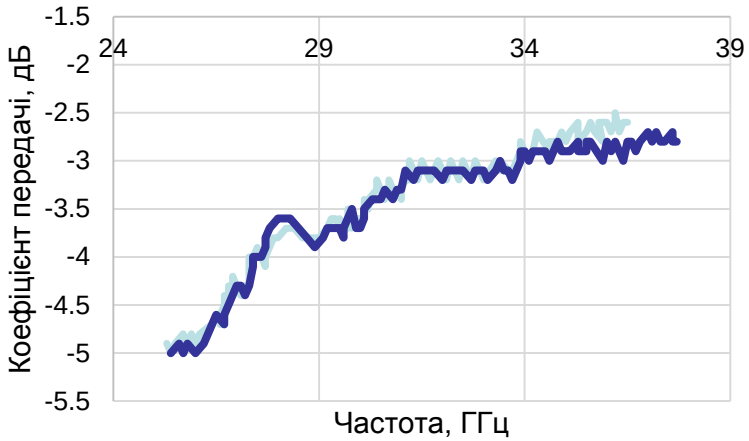


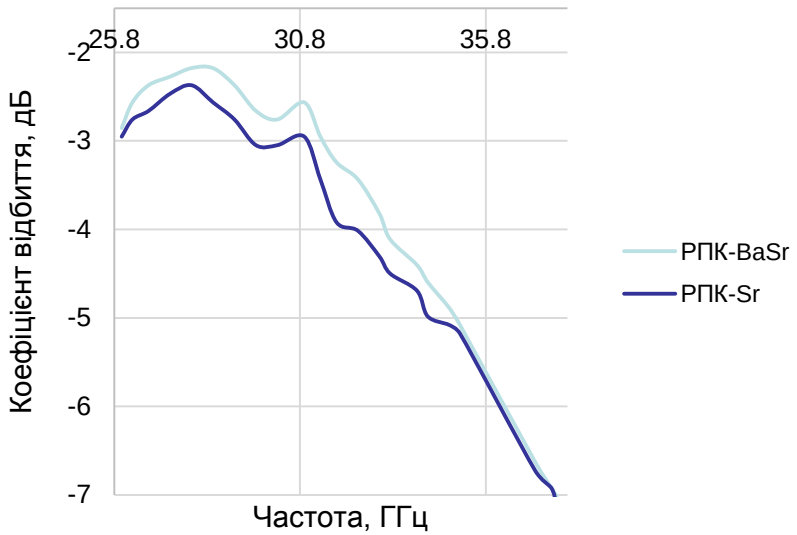


Залежність межі міцності при стиску зразків випалених при температурах 1250 та 1350 °С від технологічних параметрів

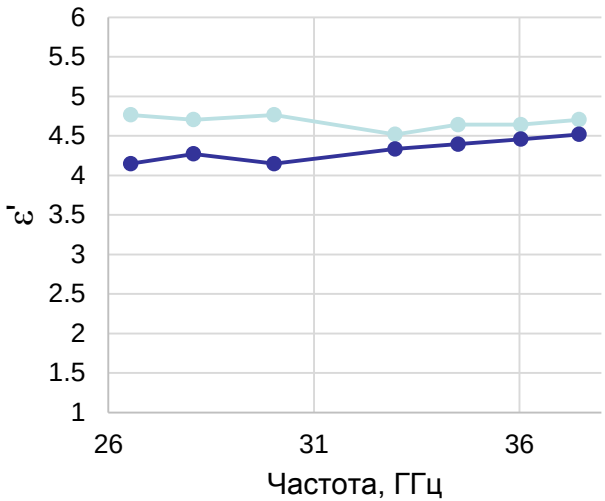
Дослідження впливу технологічних параметрів на властивості цельзіан-славсонітової кераміки / В.В Волощук, Є.В. Чефранов, М.С. Майстат та ін. (НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна). Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки: зб. наук. пр. 2019. № 119. С. 82 – 88

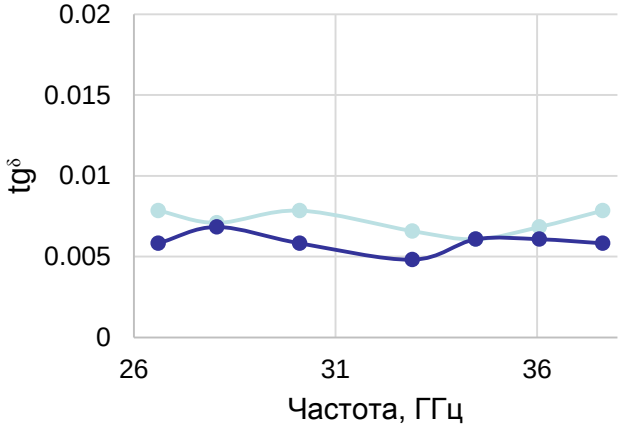
Дослідження електрофізичних характеристик мікроструктурованих матеріалів на основі системи BaO – SrO – Al2O3 – SiO2





Спектральні характеристики коефіцієнтів передачі та відбиття мікроструктурованих керамічних матеріалів





Спектри діелектричної проникності ε‘ і тангенсу кута діелектричних втрат tgδ зразків кераміки

*Ceramic materials with adjustable radiophysical properties on the basis of the system RO-Al 2 O 3 -SiO 2 / G.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok, O.Yu. Fedorenko, A.V. Zakharov, O.M. Lapuzina, V.V. Voloschuk, M.S. Prytkina, K.V.Bilohubkina // Materials of the International Meeting "Clusters and nanostructure materials (CNM-5)". October 22 – 26. Uzhgorod, Ukraine, 2018. P. 43.
**Електрофізичні характеристики кераміки на основі системи BaO –SrO – Al 2 O 3 – SiO 2 в мікрохвильовому діапазоні / В.В. Волощук, В.І. Григорук, В.В. Олійник та ін. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXVIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2021, 18-20 травня 2021 р.: у 5 ч. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 185.

Наукова новизна

- запропоновано електрохімічне формування багатошарових матеріалів шляхом періодичної зміни густини струму або потенціалу в полілігандних електролітах з чергуванням шарів сплавів системи Cu-Sn-Ni-Zn різного фазового складу;
- запропоновано визначення параметрів кінетики контактного обміну між металевою поверхнею та електролітом з використанням нелінійної поляризації за експериментальними даними;
- створено алгоритм розрахунку хімічного і фазового складу багатофазних плівок сплавів Zn-Ni, Cu-Zn і Cu-Sn на підставі аналізу анодних вольтамперограмах розчинення плівок цих сплавів;
- доведено, що покриття $[(M_1\text{-}M_2)_{баз}/(M_1\text{-}M_2)_{дод}]_n$ мають більший вміст інтерметалідів і менший вміст вільного електронегативного металу в порівнянні з шарами $(M_1\text{-}M_2)_{баз}$ і $(M_1\text{-}M_2)_{дод}$ тієї ж товщини, за рахунок зміни фазового складу шарів зі зменшенням їх товщини та часткового розчинення найбільш електронегативних фаз з шарів $(M_1\text{-}M_2)_{дод}$ в процесі осадження шарів $(M_1\text{-}M_2)_{баз}$;
- встановлено, що мікротвердість покриттів $[(Cu\text{-}Zn)_{баз}/(Cu\text{-}Zn)_{дод}]_n$, $[(Cu\text{-}Sn)_{баз}/(Cu\text{-}Sn)_{дод}]_n$, $[(Zn\text{-}Ni)_{баз}/(Zn\text{-}Ni)_{дод}]_n$, осаджених з полілігандних електролітів, екстремально залежить від їх архітектури за рахунок зміни складу сплавів з товщиною шарів, створення більш дрібних зародків при почерговому формуванні шарів, наявності мінімальної товщини суцільних шарів і погіршення структури додаткових шарів з ростом товщини;
- пріоритетно показано перевагу електрохімічно отриманих багатошарових матеріалів $[(Ni\text{-}Cu)/(M_i\text{-}M_i(OH)_2]_n$, $[(Ni\text{-}Zn\text{-}Cu)/(M_i\text{-}M_i(OH)_2)]_n$, $[(Ni\text{-}Cu)/(M_i\text{-}M_i(OH)_2\text{-}M_iOOH)]_n$ і $[(Sn\text{-}Sb)/(M\text{-}M_xO_y)]_n$ перед одношаровими покриттями у тестових реакціях виділення водню і окислення органічних речовин за рахунок більшої кількості адсорбційних місць на їх поверхні, наявності бар'єрних шарів для розчинення і більш розвиненої поверхні; розроблено параметри створення ієрархічно розвинених механічно міцних структур з мікророзмірним каркасом зі сплаву і наноструктурованої поверхнею;
- запропоновані фізичні механізми при формуванні багатошарових покриттів, коли відбуваються радіаційне пошкодження і одночасно процес релаксації дефектів будови, які реалізуються під дією теплових потоків;
- на підставі дослідження комплексного впливу постійного (Uc) та імпульсного (Ui) потенціалів зміщення в порівнянні з дією лише Uc, або Ui і показано, що в багатопараметричній задачі максимум властивостей відповідає зіставленності процесів накопичуванню пошкоджень та їх релаксації;
- встановлено, що текстурний стан та дефекти особливо впливають на механічні властивості покриттів, а нано- та мікротвердість багатошарових нитридних композитів досягає рівня 42 – 45 ГПа;
- з використанням засобів моделювання (програма TRIM) глибини проникнення та кількості вакансій при всіх каскадних пошкодженнях показано, що по глибині шару через радіаційну пошкоджуваність змінюється розподіл вакансій, але перемішування шарів для багатошарових композитів не відбувається, хоча глибина проникнення іонів Zr більша (h = 63 Å), ніж у іонів Ti (h = 52 Å), що пов'язане з атомарними розмірами та масою цих двох елементів.
- встановлено, що в дослідженому багатокомпонентному високоентропіному сплаві $Ti_{30}Zr_{25}Hf_{15}Nb_{20}Ta_{10}$ з ОЦК решіткою при одновісній деформації спостерігається висока межа плинності $\sigma_{0,2}$ ~ 1,1 ГПа для зразків у початковому стані.
- визначено мікромеханізми, що визначають пластичну деформацію сплавів системи TiZrHfNbTa з ОЦК решіткою в області низьких температур, та розраховано активаційні параметри для термоактивованого руху дислокацій при деформації $\varepsilon \approx 2\%$, які становлять від $49b^3$ при T = 345К до $6b^3$ при T = 33К.
- експериментально підтверджено можливість використання мікроструктурованої кераміки заданого цельзіан-славсонітового складу для створення покриттів та деталей в галузі електротехніки та авіації, які характеризуються низькими показниками діелектричних характеристик (ε = 4,5÷4,7; tgδ = 0,0060÷0,0078), як радіопрозорого матеріалу в широкому діапазоні радіочастот 25,8 – 37,5 ГГц.

Практична значимість

Практичне значення одержаних результатів для альтернативної енергетиці, машинобудівної та хімічної галузей полягає у тому, що, ***у порівнянні з кращими вітчизняними та світовими аналогами***:

•використання полілігандних систем при електроосадженні мультишарових покриттів $[(M_1\text{-}M_2)_{баз}/(M_1\text{-}M_2)_{дод}]_n$ забезпечує більш широкий спектр фазового складу шарів сплавів, що, на відміну від відомих покриттів на основі сплавів Cu-Zn [*J. Alloy Compd.*, 2019, 792, 770-779], Cu-Sn [*Thin Solid Films*, 2019, 669, 85-95; *Wear*, 2019, 426, 258-264] і Zn-Ni [*Process Saf. Environ*., 2020, 141, 366-379; *Surface and Coatings Technology*, 2019, 359, 206-215.], призводе до зменшення струму корозії покриттів у 1,5-2 рази і підвищення їх мікротвердості на 10-40 %, внаслідок чого сприяє збільшенню строку експлуатації виробів або дозволяє знизити товщину покриття у 1,3-5 разів;

•наявність мультишарової структури електрокаталітичного нікель-мідного покриття забезпечує його високу корозійну та механічну стійкість, що сприяє збереженню каталітичної активності поверхні при більш тривалій експлуатації в порівнянні з відомими у світі одношаровими покриттями сполуками міді та нікелю [*Int. J. Hydrogen Energ.*, 2021, 46(56), 28527-28536]; електрод $[(Ni\text{-}Cu\text{-}(M_3))/(M_i\text{-}M_i(OH)_2)]_n$ для виділення водню дозволяє підвищити продуктивність електролізу в 1,4…1,6 рази; електроди $[(Ni\text{-}Cu)/(M\text{-}M(OH)_2\text{-}MOOH)]_n$ та $[(Sn\text{-}Sb)/(M\text{-}M_xO_y)]_n$, конкурентно спроможні на ринку безплатинових електродних матеріалів для окислення органічних речовин.

•використання нелінійної поляризації за заданими експериментально даними, на відміну від використання лінійної поляризації [*Electrochim. Acta*, 2017, 255, 1-8], значно (в залежності від умов експерименту, на 5-80%) підвищує точність визначення параметрів контактного обміну в електролітах і прогнозувати його наслідки.

•електрод $[(M_1\text{-}M_2\text{-}(M_3))/(M_i\text{-}M_i(OH)_2)]_n$ для виділення водню дозволяє підвищити продуктивність електролізу в 1,4…1,6 рази і стабілізувати властивості електроду при його тривалій експлуатації у лужному середовищі; електроди $[(Ni\text{-}Cu)/(M\text{-}M(OH)_2\text{-}MOOH)]_n$ та $[(Sn\text{-}Sb)/(M\text{-}M_xO_y)]_n$, конкуренто спроможні на ринку безплатинових електродних матеріалів для окислення органічних речовин, у тому числі в паливних елементах, за рахунок підвищених показників каталітичної активності, зниження матеріалоємності і підвищення стійкості в процесі експлуатації.

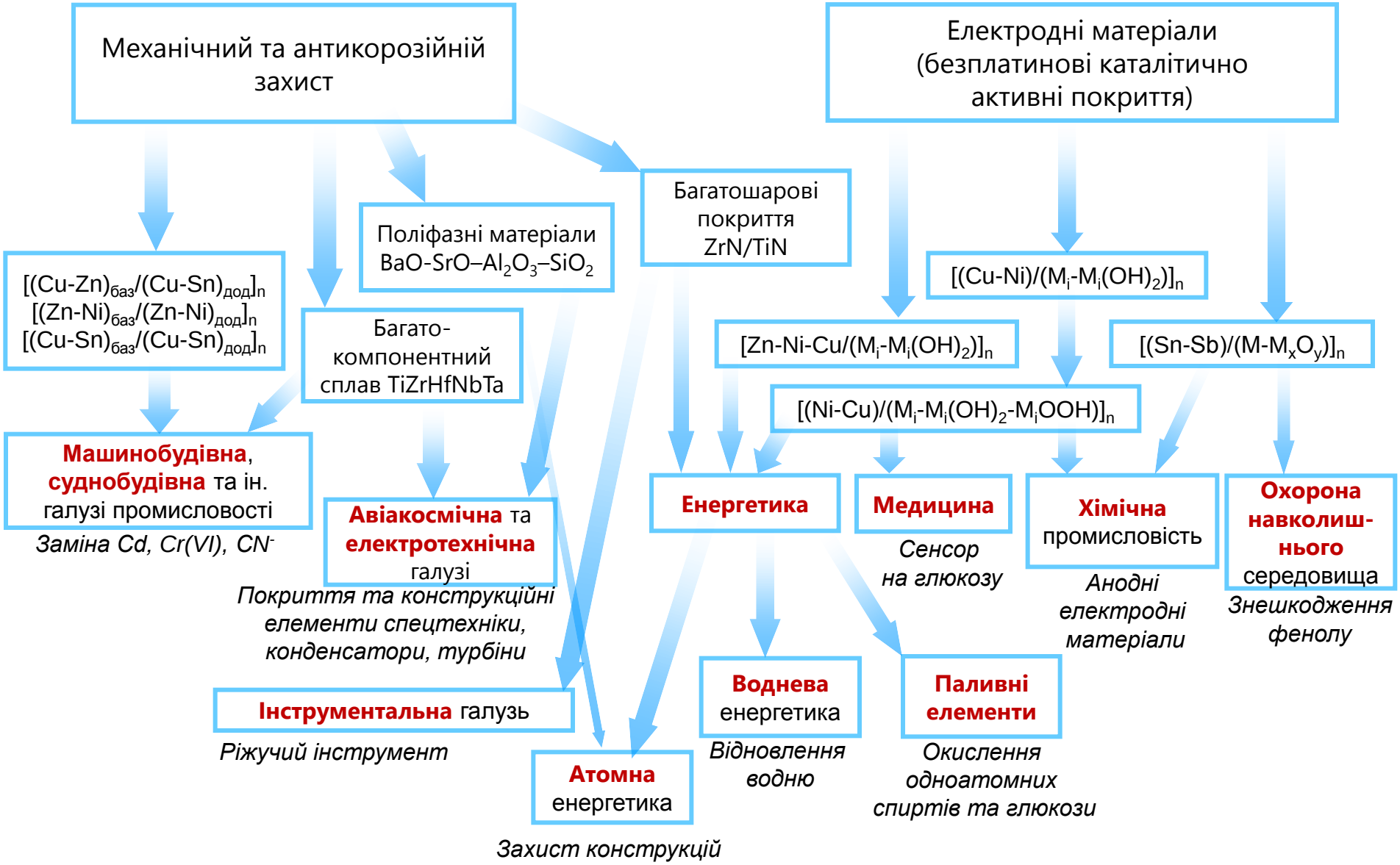
•Вакуумно-дугові багатошарові покриття TiN/ZrN, які поєднують високі значення твердості, зносостійкості, є перспективними для застосування в медицині, в атомній та ін. галузях промисловості України, промисловості в якості захисних, надтвердих покриттів. Крім того, запропоновані фізичні уявлення, які впливають на структуру, субструктуру та механічні властивості покриттів, дозволяють цілеспрямовано розробляти конкретні технології отримання високотвердих та зносостійких структур різних металів, заздалегідь оцінювати рівень значень твердості та залишкових напружень.

•Високоентропійні сплави системи TiZrHfNbTa можуть бути використані в ядерній промисловості. Великий опір високому опроміненню і висока корозійна стійкість роблять їх потенційними кандидатами для облицювальних матеріалів, що використовують для ядерного палива і посудин високого тиску, а також можна використовувати в якості оболонок для мобільних об'єктів, анодних матеріалів батарей і транспортної промисловості….

•В авіакосмічній галузі отримані сплави можуть використовуватися в якості теплових бар’єрів для зверхзвукових літаків, лопаток для газових турбін або як захисний шар для збереження властивостей матеріалу при більш високих температурах на довший час.

•Розроблені мікроструктуровані радіопрозорі керамічні матеріали на основі системи $BaO – SrO – Al_2O_3 – SiO_2$ використовуються при створенні носових антенних обтічників авіаційних ракет «повітря-повітря», «повітря-поверхня» та ракет для зенітно-ракетних комплексів. Крім того виготовляється різноманітні складові частини комплексів авіаційного та протитанкового озброєння з підвищеною термостійкістю, у тому числі труби, стрижні, пластини, оглядові вікна тощо.

Використання результатів роботи



Публікації

Результати представлені у:

- 1 монографії;
- 5 розділах монографій;
- 37 публікаціях у **Scopus/WoS**:
  23 мають імпакт-фактор;
- 21 статтях у фахових виданнях України;
- 4 статтях у закордонних фахових виданнях;
- 5 патентах України на винахід;
- 1 патенті України на корисну модель;
- 68 матеріалах та тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.