

ВІДГУК

офіційного опонента, д-ра фіз.-мат. наук, професора, завідувача кафедри фізики
Національного університету «Запорізька політехніка»
Лоскутова Степана Васильовича
на дисертаційну роботу Ганича Руслана Пилиповича
“Структура й властивості сплавів на основі заліза, отриманих за допомогою імпульсного
електролізу”, що представляється на здобуття
наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук по спеціальності
01.04.07 – “Фізика твердого тіла”

Дослідження структурних перетворень приповерхневих шарів металів являється однією з головних задач фізики твердого тіла та фізики металів. У дисертації Ганича Руслана Пилиповича розглядаються експериментальні та теоретичні аспекти структуроутворення металевих плівок, що знаходяться під впливом електричних полів в електроліті.

Дисертаційна робота Руслана Пилиповича виконувалась по тематиці кафедри фізики Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна в рамках двох держбюджетних тем: «Підвищення корозійної стійкості деталей рухомого складу шляхом нанесення аморфних покриттів» та (№ держреєстрації 0108U001845), «Підвищення функціональних властивостей деталей рухомого складу методом нанесення металевих покриттів» (№ держреєстрації 0110U000332).

Основу дисертаційної роботи Ганича Р.П. становлять експериментальні та теоретичні дослідження фізичних закономірностей електролітичного осадження металевих плівок сплавів на основі заліза імпульсним струмом. Процес нестаціонарної електрокристалізації сприяє утворенню нерівноважних (частково аморфних) структур. На даний час інтерес до сплавів з аморфною структурою на основі металів підгрупи заліза з металоїдами, постійно зростає у зв'язку з поширенням використанням даної групи металів у промисловості. Залежно від вмісту металоїдів в цих сплавах реалізовується аморфна, аморфно-кристалічна або кристалічна структура. Це суттєво впливає на фізико-хімічні властивості сплавів, покращуючи їх, порівняно з властивостями сплавів, отриманих за допомогою постійного струму.

В останні роки інтенсивно розвивалися теоретичні моделі, однак, низка питань кінетики електроосадження залишаються відкритими. У зв'язку з цим вивчення кінетики формування структури та особливостей будови електроосаджених плівок є одним з найбільш важливих напрямків фізики конденсованого стану, оскільки представляє не тільки науковий, але й практичний інтерес, відкриває шлях керованого створення матеріалів з прогнозованими фізико-хімічними властивостями, що в цей час **є актуальною науковою проблемою**.

Достовірність результатів, отриманих автором дисертації, у першу чергу визначається тим, що основні експериментальні результати були отримані в ході виконання держбюджетних тем на обладнанні і приладовій базі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, в Українському державному хіміко-технологічному університеті (м. Дніпро), в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (м. Київ) та в Українському державному інституті мінеральних ресурсів (м. Дніпро), на базі Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара (м. Дніпро).

Достовірність результатів, одержаних в дисертаційній роботі, досягалася використанням різноманітних і взаємодоповнюючих сучасних методів, які дали змогу виконати дослідження на різних за локальністю структурних рівнях, обґрунтованістю припущень, що використовувались при побудові моделей. Ці експериментальні дані несуперечливі, а теоретичне трактування пояснює їх результати і не протирічає відомим загальноприйнятим уявленням. Достовірність одержаних результатів та наукових положень дисертації забезпечена використанням комплексу сучасних фізичних методик. Основні висновки ро-

боти не суперечать встановленим раніше закономірностям протікання фізичних процесів формування структури електроосаджених плівок.

Обґрунтованість наукових висновків дисертації Ганича Руслана Пилиповича базується на отриманих автором експериментальних та теоретичних результатах, які були взаємно доповнюючими, а також порівнювалися з результатами інших дослідників.

Дисертаційна робота Ганича Руслана Пилиповича складається з п'яти розділів, з яких **перший розділ** – огляд сучасного становища наукових досліджень в області експериментальних та теоретичних досліджень механізмів режимів електролізу для отримання металевих покриттів і сплавів на катоді. Розглядається вплив параметрів змінного струму на структуру, фазовий склад і морфологію поверхні в утворюваних покриттях. Слід відзначити детальність огляду, значну кількість використаної літератури.

Вплив пересичення на формування структури плівок заліза:

- при малих пересиченнях формуються полігональні кристали з великокутовими межами. При проміжних значеннях пересичення утворюються кристаліти видовженої форми, а при більших значеннях утворювались зерна помилкової форми. Кристаліти склалися з окремих субзерен, межі яких мали дислокаційну будову. При цьому найбільша густина дислокацій відзначалась у кристалітах, орієнтованих у напрямку $\langle 111 \rangle$;

- високе значення пересичення породжує межі між зернами катодних покриттів недислокаційного типу, значну дезорієнтацію сусідніх зерен, велику кількість дефектів пакування;

- при досягненні деякого критичного значення пересичення, стає можливим утворення двовимірних зародків в залізних покриттях, а також виникнення помилок росту двійникових дефектів;

- різка відмінність у швидкостях росту кристалів в різноманітних напрямках сприяє утворенню в процесі електрокристалізації текстурованих осадів;

- в осадках металів, які мали ОЦК решітку, віссю текстури виявлялись напрямки $\langle 100 \rangle$ або $\langle 110 \rangle$, у тому випадку, якщо в них діяли напруження стиску; у ГЦК ґратки за цих умов деформації слід очікувати вісь текстури $\langle 111 \rangle$.

Електроосадження аморфних сплавів:

- високе значення перенапруження на катоді в процесі виділення металу на основі формуючого сплаву;

- аморфні сплави формуються переважно при вмісті другого компоненту понад 15 ат. %;

- у більшості аморфних сплавів існує близький порядок, незвичні магнітні, механічні, електричні та корозійні властивості;

- частка водню адсорбувалась осадам у вигляді протонів, що викликало невпорядкованість у розподілі електронної густини;

- аморфні сплави, що містять фосфор, у випадку, якщо вони не покриті стабільною поверхневою плівкою, розчиняються найбільш активно. Як наслідок, всі корисні, для підвищення корозійної стійкості аморфних сплавів властивості, зосереджені у пасивуючій плівці.

Електроосадження імпульсним струмом:

- зменшення шорсткості покриттів і поліпшення їх адгезії з підкладкою;

- покриття, вміщуючи 6–14 ат. % фосфору, були кристалічними, у той час, як з 32 ат. % – повністю аморфні;

- для чистого заліза при електролізі на постійному та імпульсному струмах розмір зерен складав відповідно 3 та 1,3 мкм, при вмісті фосфору в покритті близько 11 ат. % – 0,02 та 0,01 мкм. У сплаві, що містив фосфору понад 16 ат. %, спостерігалась аморфна структура;

- в імпульсних режимах відбувається більш однорідний розподіл хімічних елементів в електролітичних сплавах як по їх товщині, так і по поверхні.

Магнітні властивості:

- тонкі шари намагнічуються до насичення при більш низьких значеннях намагнічуючого поля, ніж товсті шари (70–190 мкм). Відповідно, магнітна проникність у тонких шарів була вища. В багатошарових структурах спостерігався ефект гігантського магнітоопору, котрий може бути зумовлений антиферомагнітним впорядкуванням магнітних моментів сусідніх шарів;

- збільшення вмісту фосфору призводило до спотворення кристалічної ґратки і зменшення розмірів кристалітів у плівках, що обумовлювало зниження намагніченості насичення. Спостережуване зменшення насичення намагніченості пов'язане з явищем супермагнетизму дрібних однодоменних часточок.

У другому розділі наводиться опис методик отримання металевих плівок, дослідження їх структури та фізичних властивостей.

Експериментальні дослідження структури і фазового складу Fe, Fe-Ni, Fe-P і Fe-Ni-P покриттів здійснювалися за допомогою рентгеноструктурного аналізу. Хімічний склад і кінетику фазових перетворень у плівках визначали рентгеноспектральним і дериватографічним методами. Морфологію поверхні та структуру поперечного перерізу сплавів досліджували за допомогою металографічної і електронної мікроскопії. Для вивчення властивостей електролітичних покриттів застосовували: магнітометричні, трибометричні, термогравіметричні та оптичні методи. Вольт-амперні залежності отримували за допомогою гальваностатичного і потенціостатичного методів.

Дослідження фазового складу і структури металевих покриттів було проведено рентгеноструктурними методами і методами електронної мікроскопії. Дослідження елементного складу проведено на рентгенівських спектрометрах. Криві диференційного термічного аналізу одержано на дериватографі. Для дослідження магнітних властивостей використовували вібраційний магнітометр. Мікроструктуру і морфологію поверхні досліджували металографічним методом з використанням оптичних мікроскопів. Визначалися також і оптичні властивості покриття - коефіцієнт відбиття. Проводилися випробування на зносостійкість та корозійні властивості.

У третьому розділі представлені результати дослідження впливу величини катодного перенапруження, яке виникає в момент дії імпульсного струму, на структуру, морфологію та фазовий склад залізних і залізо-нікелевих покриттів. Наведено розрахункові дані кінетики утворення і зростання кристалічних зародків у процесі змінної електрокристалізації.

Наведені результати дослідження кінетики зародкоутворення при різних значеннях перенапруги катода. Встановлено, що в імпульсних режимах електроосадження на катоді створюються пересичення на порядок більші, ніж на постійному струмі.

Зроблено висновок про те, що зі збільшенням перенапруження, переважним механізмом формування плівок ставало некогерентне зародкоутворення, що призводило до формування в покриттях двійників, концентрація яких з подальшим зростанням пересичення зростала і призводила до їх трансформації в дефекти упаковки деформаційного типу з дезорієнтуванням фрагментів до 5°.

При електрохімічному виділенні металів і сплавів в якості пересичення може використовуватися катодне перенапруження, яке чисельно можна визначити як різницю значень поточного та рівноважного потенціалів катода.

За рахунок того, що часу для проходження заряду через електроліт втрачається дуже мало, це призводить до того, що **розряд іонів металу протікає при більш від'ємних значеннях потенціалу катода**, у порівнянні з режимами стаціонарного електролізу. Такий процес сприяє подрібненню структури, збільшенню кількості дефектів кристалічної ґратки і, відповідно, змінює фізико-хімічні властивості покриттів.

Під час дії паузи струму, у залежності від її тривалості, відбувається повне або часткове вирівнювання концентрацій іонів у прикатодній області за рахунок руху їх з об'єму електроліту. Чим коротше був імпульс, тим ближче фронт дифузії до поверхні катода і

тим швидше відбувається вирівнювання концентрацій іонів, що розряджаються, а це дозволяє збільшувати амплітуду прямих імпульсів і впливати на структуру та якість покриття. Найбільш вагома роль паузи полягає у **релаксації виведеної з рівноваги системи катод–електроліт**.

Величина перенапруження на катоді чинить вплив на структуру покриття, що утворюється. Чим воно вище, тим дрібніші зародки. Важливою особливістю структури електролітичних осадів, отриманих на імпульсному струмі, при високих катодних пересиченнях, являється велика концентрація точкових і лінійних дефектів кристалічної ґратки. Головною причиною походження лінійних дефектів, при імпульсному електролізі, являється високе значення пересичення на фронті кристалізації. Це призводить до незбігу кристалографічних орієнтацій наново виникаючих зародків з попередніми.

Результати рентгеноструктурних досліджень свідчать про те, що дифракційні лінії, отримані від покриття, розширені, а максимумами зміщені у бік великих кутів ковзання у порівнянні з еталонами.

За своїм ефектом дію зворотних імпульсів можна порівняти з відпалом у металургії.

Іони металів, що осаджувалися, не встигали продифундувати до своїх рівноважних місць. Це призводило до того, що метал ставав перенасичений вакансіями, і як наслідок, періоди ґраток ставали менше еталонних значень. В сплавах виникали внутрішні напруження розтягу (–). По мірі зниження катодного перенапруження домінуючим фактором, що вносив вклад у викривлення ґратки, становив занурений на місце вакансій і в міжвузля атомів металів водень. Це призводило до зміни знаку внутрішніх напружень у покриттях з розтягнення (–) на стиснення (+).

Однією з причин більш інтенсивного збільшення розмірів блоків мозаїки при 693 К ізотермічного відпалу, можна пояснити тим, що водень, який знаходився у кристалічній ґратці у частково іонізованому стані у вигляді хмарин Котрелла, знижує дифузійну рухомість дислокацій і перешкоджає перебудові дислокацій з «горизонтальних» угруповань у «вертикальні». При підвищенні температури відбувається розпад хмарин Котрелла. Водень дифундує з покриття, рухомість дислокацій збільшується, і межі блоків мозаїки стають більш рухливими. Аналізуючи отримані результати зміни тонкої структури заліза і його сплавів з нікелем від температури відпалу, можна припустити, що причиною зменшення періоду кристалічної ґратки, при великих пересиченнях на катоді, являється утворення дефектної структури. Не виключено, що занурення водню в структуру осаду також чинить вплив, однак переважаючим фактором являється нерівноважна кристалізація, про що свідчить велика концентрація вакансій і дислокацій та зменшення періодів ґраток в вихідних зразках у порівнянні з відпаленими.

Оцінка енергії активації процесу ізотермічного відпалу залізних та залізо–нікелевих сплавів, отриманих імпульсним струмом, показала, що її значення не перевищують 0,5–0,6 еВ. Це значно менше, ніж енергія утворення і міграції моновакансій у нікелю (1,4–1,5 еВ) і залізі (1,3–1,6 еВ). Можна припустити, що у процесі імпульсного електролізу великій кількості вакансій, що утворюються, енергетично вигідніше об'єднуватися у пари, формуючи дивакансії. Об'єднання моновакансій призводить до зменшення їх сумарної поверхневої енергії, що забезпечує їх стійкість у часі.

Четвертий розділ присвячено результатам дослідження впливу катодного перенапруження на структуру, фазовий склад і морфологію Fe-P та Fe-Ni-P електролітичних плівок. Досліджено структуру сплавів після ізотермічних відпалів.

Порівняння структур сплавів, що містять однакову кількість фосфору (13-14 ат. %), отриманих за допомогою постійного та імпульсного струмів показало, що вона може бути повністю або частково аморфною (імпульсний режим), або кристалічною (стаціонарний режим). Широкий діапазон структур, що виникають при незмінній концентрації аморфізатора, пов'язаний зі ступенем перенапруги у момент дії імпульсу від 0,15 В до 0,25 В і швидкістю її зміни від 26 В/с до 360 В/с. Це впливало на критичний радіус утворюваних зародків і швидкість їх подальшого зростання.

В залежності від концентрації гіпофосфіту у розчині електроліту і густини струму структура металевих покриттів, що утворювались на катоді, могла бути аморфною, кристалічною або змішаною.

В цих дослідях величини середньої густини струму, концентрації гіпофосфіту та температури електроліту фіксувалися. Частота і шпаруватість імпульсів, а відповідно, і перенапруження, змінювались.

Аналізуючи отримані результати, можна дійти висновку, що на умови утворення аморфної структури у сплавах Fe-P і Fe-Ni-P чинило суттєвий вплив катодне перенапруження. За рахунок цього на імпульсних режимах з'явилась можливість формування аморфної структури у покритті при меншому вмісті фосфору (на 2-3 ат. %) у порівнянні зі сплавами такого ж складу, але отриманими на постійному струмі.

Перенапруження на катоді і швидкість його зміни можна порівняти зі швидкістю переохолодження. Зі збільшенням швидкості охолодження аморфний стан фіксується при більш високих температурах склування, тому аморфна структура відповідає більш високим температурам рідини. Внаслідок цього аморфні сплави, отримані при різних перенапруженнях катоду, мають у початковому стані різні значення в'язкості, а відповідно, і різні значення коефіцієнту дифузії.

П'ятий розділ присвячений вивченню фізико-хімічних властивостей Fe, Fe-Ni, Fe-P та Fe-Ni-P плівок, отриманих імпульсним струмом.

Дослідження сплавів, які містять фосфор, показали, що в якості зносостійких вони можуть використовуватися тільки після попередньої термообробки, в процесі якої збільшується їх адгезія до підкладки, на яку вони були осаджені, в результаті чого відбувається їх дегазація і зменшення частинки вільного об'єму.

При дослідженні оптичних властивостей електролітичних покриттів було з'ясовано, що зі зменшенням ОКР коефіцієнт їх дзеркального відображення збільшувався до 71–85 % у порівнянні з алюмінієвим дзеркалом, використаним в якості еталону. Для сплавів, що містять фосфор, і мають аморфну будову ($P > 17$ ат. %), значення дзеркального відображення наближалось до 100 %, отже, такі покриття можуть бути використані як декоративно-захисні.

Корозійні випробування фосфоровмісних сплавів показали їх високу стійкість при використанні в агресивних середовищах за умов наявності аморфної будови, що пов'язано з формуванням на їх поверхні корозійностійких оксидних та фосфідних плівок, та зсувом рівноважного потенціалу аморфних сплавів в електропозитивну область на 0,12–0,23 В.

Густина дислокацій в досліджуваних сплавах, отриманих за допомогою імпульсного струму, коливалась в межах 10^{10} – 10^{11} см⁻², тоді як для сплавів того ж складу, отриманих постійним струмом, була на порядок менша.

Низькі значення коерцитивної сили у сплавах з аморфною структурою можуть бути викликані тим, що аморфні структури ізотропні, у них відсутня кристалографічна анізотропія, а константа магнітної анізотропії близька до нуля. Сплави з аморфною структурою внаслідок малих значень коерцитивної сили, можна віднести до магнітом'яких. Найбільше значення насичення намагніченості досягала при вмісті фосфору у сплавах 8-9 ат. %. Для залізо-фосфорного сплаву її значення було рівне 0,22 Тл, а при додаванні нікелю у сплави її значення збільшувалось до 0,67 Тл. При утворенні аморфної структури у покриттях намагніченість насичення незначно знижувалась у Fe-P до 0,15 Тл, у Fe-Ni-P до 0,22 Тл. Таке велике зменшення насичення намагніченості у залізо-нікель-фосфорному сплаві, певно, пов'язане з тим, що сплав нікелю з фосфором, що має аморфну будову, виявляється слабомагнітним та йому властиві ознаки парамагнітних матеріалів.

Вимірювання мікротвердості фосфоровмісних сплавів у первинному стані показали, що її максимальне значення не перевищувало 4900–5100 МПа за концентрації фосфору 8-10 ат. %, отриманих на частоті 30 Гц. Ці значення менші у порівнянні з покриттями, отриманими за тих же параметрів імпульсного струму, але без фосфору.

Дослідження зносостійкості електролітичних сплавів показали, що зміна структури покриття відбувається аналогічно зміні мікротвердості. Для сплавів заліза спостерігалось порушення цієї залежності. При розмірі ОКР – 50–160 нм у покриттях, отриманих на частоті 30 Гц, спостерігалось падіння зносостійкості. Пояснити це можна більшою кількістю водню, що проникає у покриття, деформація якого призводить до виникнення сітки мікротріщин і його крихкості при терті по поверхні.

Дослідження сплавів, які вміщують фосфор виявило, що покриття які не пройшли термообробку, не можуть бути зносостійким матеріалом, вони вже при навантаженні 1 МПа руйнуються і відшаровуються від основи. Термообробка протягом 20 хвилин дозволяє нівелювати цей недолік.

Збільшення коефіцієнта дзеркального відбиття до 100 % можна пояснити тим, що розміри областей відбиття стають сумірними з областями розсіяння в алюмінієвому дзеркалі, використаному в якості еталона.

Хімічний склад структури сплавів справляє вплив на їх корозійні властивості. Проведені дослідження показали, що у покриттях, отриманих на імпульсному струмі, пористість значно менша, у порівнянні з покриттями, отриманими на постійному струмі.

Пасивація аморфних сплавів, що містять фосфор, відбувається внаслідок конкуренції двох реакцій: реакції утворення фосфіну, руйнуючого метал, та реакції утворення оксиду. Заміна частини атомів заліза атомами нікелю, внаслідок розчинення покриття і збагачення поверхні хімічно стійким елементом, призводить до збільшення корозійної стійкості сплавів. Оксидні і фосфідні плівки, які утворюються на його основі, мають більш високі корозійні властивості.

Новизну роботи складають результати експериментального і теоретичного дослідження формування та еволюції поверхневих плівок при електролітичному осадженні, структурних та енергетичних характеристик:

1. Вперше встановлено, що нерівноважні умови електрокристалізації сплавів залізо-нікель дозволяють розширити область існування α -фази заліза з ОЦК решіткою (до 30 ат. % Ni) з одночасним пригніченням виникнення γ -фази на основі нікелю з ГЦК решіткою у порівнянні зі сплавами, отриманими металургійним способом (до 10 ат. % Ni) в рівноважних умовах.

2. Встановлено, що зі збільшенням перенапруження на катоді структура покриттів змінювалася від досконалої з чіткими межами зерен (при $\eta=190-250$ мВ) до дрібнокристалічної з великою кількістю дефектів упаковки типу віднімання і двійників (при $\eta=450-550$ мВ); при цьому механізм формування покриття на катоді змінювався з нормального росту на шаруватий.

3. На основі проведеного розрахунку енергії активації міграції точкових дефектів (0,5–0,6 еВ) встановлено, що в сплавах, отриманих у нерівноважних умовах електрокристалізації, і, як наслідок, пересичених вакансіями, відбувається їх об'єднання в дивакансії або утворення комплексів вакансія-атом водню.

4. Встановлено, що аксіальна текстура заліза відрізняється стабільністю і збільшення концентрації легуючого елементу в однофазних сплавах залізо-нікель з ОЦК граткою не чинить значного впливу на її вісь і ступінь досконалості.

5. В рамках класичної теорії зародкоутворення Зельдовича запропоновано модель, що дозволяє оцінити розміри кристалітів в електролітичних покриттях, які формуються за механізмом Странського – Крастанова при великих катодних перенапруженнях ($\eta > 0,35$ В).

6. Вперше встановлено, що в кристалічних сплавах Fe-P та Fe-Ni-P, отриманих в умовах нерівноважної електрокристалізації, формуються пересичені тверді розчини заміщення з концентрацією фосфору (5–8 ат. %), що перевищує рівноважну концентрацію, яка становить ≈ 1 ат. % фосфору.

7. Встановлено, що використання нерівноважної електрокристалізації призводить до виникнення у сплавах Fe-P та Fe-Ni-P аморфної структури при меншому вмісті фосфору (13-14 ат. %) порівняно зі сплавами, отриманими на постійному струмі (16-17 ат.%).

Розробки захищені трьома патентами України.

В дисертаційній роботі послідовно і обґрунтовано виконано дослідження процесу формування та еволюції металевих плівок в умовах використання імпульсного струму, який характеризується такими параметрами, як частота, шпаруватість і формою імпульсів.

Результати та висновки дисертаційної роботи Ганича Руслана Пилиповича є **значним внеском** у розвиток дослідження процесів структуроутворення металевих плівок в умовах електроосадження та процесів які проходять у приповерхневій області металів.

Дисертаційна робота Ганича Руслана Пилиповича являє собою **завершене наукове дослідження**, яке відзначається послідовністю та внутрішньою логікою побудови. **Зміст дисертації** викладено з усіма необхідними подробицями і має багатий графічний матеріал у вигляді графіків (66 рисунків). Значна кількість таблиць (11 таблиць), в яких зібрано чисельні результати експериментів та розрахунків, доповнюють деталізацію дисертаційного матеріалу. **Оформлення дисертації** відповідає усім вимогам МОНУ.

Слід відзначити фундаментальність літературного огляду, який спирається на список наукових публікацій в закордонних та вітчизняних виданнях, що складає майже 187 джерел.

Слід зробити наступні **зауваження** до дисертаційної роботи Ганича Руслана Пилиповича:

1. Не має конкретності у формулюванні висновків по літературному огляду (розділ 1 **СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ**). «На основі проведених літературних досліджень, була поставлена ціль і сформульовані задачі дослідження».

2. Формування деяких положень не конкретизовані, розпливчаті формулювання:

«Дослідження здійснювались шляхом поєднання стандартних експериментальних методів з методами математичного моделювання.»

«... дослідження впливу імпульсного струму на кінетику утворення і зростання металевих фаз на поверхні катода, структури і властивостей сплавів на основі заліза є на сьогодні актуальним завданням.»

3. Твердження типу «Зйомка проводилась зі швидкістю 4 град/хв.» малоінформативні.

Зразок: «Виміри виконувалися на кобальтовій трубці (К_β-лінія) при прискорювальній напрузі 30 кВ і струмі 20 мА. Здійснювалося трикратне сканування із кроком 0,1 град і постійної часу 7 с.»

4. «Відомо, що силові лінії електричного поля по поверхні катода розподіляються нерівномірно». Як виміряти? Масштаб нерівномірності?

5. Спостерігається аналогія:

- сплав Fe-P отримували за допомогою надшвидкісного охолодження з розплаву;
- сплав Fe-P отримували за допомогою імпульсних режимів електролітичного осаження.
Чим пояснити однокові результати по структурі та властивостям?

6. У чому полягає фізична суть процесів формування електролітичних покриттів при використанні імпульсного струму:

- «нестационарна електрокристалізація» ?

- «швидкість структуроутворення»?

7. Чим пояснюється використання магнітних методів дослідження для підтвердження «Існування аморфної структури у сплавах на основі заліза, що вміщують фосфор».

8. У чому полягає логіка досліджень: перехід від оптичних властивостей покриття до корозійних?

9. Наведено дані про дослідження: «До початку проведення випробувань у кліматичній камері в покриттях заліза та залізо-нікелю, отриманих на постійному струмі фіксувалось

1,1–1,3 пор/см² при товщині 19–21 мкм та 13–15 мкм відповідно. У покриттях, отриманих на імпульсних режимах осадження, пори не спостерігались вже при товщині понад 2-3 мкм.» – У тексті немає «Методика вимірювань пористості».

Наведені зауваження, однак, не знижують високий науковий рівень дисертаційної роботи Ганича Руслана Пилиповича, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати по проблемі встановлення фізичних закономірностей та механізмів формування структури і фазового складу сплавів на основі заліза під дією імпульсного струму і керування їх властивостями.

Результати та висновки, що отримані у дисертаційній роботі Ганича Руслана Пилиповича, є **значним внеском** в розвиток фізики процесів структуроутворення металевих плівок в умовах електроосадження. Текст дисертації викладено достатньо детально.

Окремо зазначимо, що **зміст автореферату** і основних положень дисертації є ідентичними.

Дисертаційна робота Ганича Руслана Пилиповича відповідає вимогам “Порядку присудження наукових ступенів”, затверджену Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. №567 зі змінами, затвердженими Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015р. та №1159 від 30.12.2015р., а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
професор

Лоскутов С.В.

Підпис Лоскутова С.В. засвідчує
вчений секретар вченої ради
НУ “Запорізька політехніка”
к. соц. н., доцент



Кузьмін В.В.