

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.168.02
Академіку НАН України, д.ф.-м.н., професору
Валентину ТАТАРЕНКУ

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Семенюк Надії Іванівни**
«Управління морфологією та фізико-механічними властивостями
поверхні твердих тіл під дією щільних низько-енергетичних іонно-
плазмових потоків», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – Фізика твердого тіла

Актуальність теми дослідження.

Фізико-механічні властивості поверхні матеріалів у багатьох випадках обумовлюють функціональні характеристики виробів, в яких вони застосовуються. Тому забезпечення можливості здійснення контрольованого впливу на структуру і, як наслідок, на властивості (при)поверхневих шарів матеріалів є актуальним завданням сучасних фізики твердого тіла і матеріалознавства. На сьогоднішній день широкого розповсюдження набули іонно-плазмові методи модифікації поверхні матеріалів. Однак, в більшості випадків впливу іонно-плазмових потоків піддаються не тільки (при)поверхневі шари, а і об'єм твердого тіла, що приводить до більших енергетичних втрат на обробку та, інколи, до небажаної зміни структурно-фазового стану об'єму матеріалу. Тому постає нагальна необхідність розробки таких фізико-матеріалознавчих підходів до іонно-плазмової модифікації твердого тіла, які б забезпечили локальність впливу із зміною стану лише (при)поверхневих шарів без збурення об'єму матеріалу. В дисертаційній роботі Н.І. Семенюк досліджено взаємодію поверхні твердих тіл різної природи – металів, напівпровідників, діелектриків – із щільними іонно-плазмовими потоками помірної енергії та виявлено фізичні механізми цієї взаємодії, які уможливають контрольовану модифікацію виключно поверхневих шарів твердого тіла із наданням цим шарам наперед-заданих фізико-механічних властивостей. Цей факт обумовлює **беззаперечну актуальність** теми даної дисертаційної роботи.

В роботі Н.І. Семенюк поставлено та успішно вирішено наступні **завдання дослідження**:

- дослідити процеси прискорення іонно-плазмових потоків в приелектродних шарах неоднорідної плазми;
- вивчити механізми створення на поверхні твердого тіла ієрархічних двомасштабних структур з нанорозмірною складовою;

- визначити вплив мікроскопічних параметрів поверхневих структур на фізико-механічні характеристики модифікованої поверхні твердого тіла.

Усі ці задачі є **актуальними** та своєчасними як з фундаментальної точки зору, так і з точки зору можливості практичного використання результатів дослідження. Таким чином, **актуальність** досліджень, представлених в дисертації Н.І. Семенюк, не викликає сумнівів.

Тема і зміст дисертаційної роботи Н.І. Семенюк повною мірою відповідає паспорту спеціальності 01.04.07 – Фізика твердого тіла.

Структура дисертації, основні наукові результати, їх новизна, ступінь обґрунтованості та достовірності.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел, що містить 243 посилання. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 156 сторінок, робота містить 44 рисунка та 4 таблиці.

Анотація містить короткий опис отриманих в роботі результатів та перелік наукових праць автора, опублікованих за темою дисертаційного дослідження.

У *вступі* обґрунтовано актуальність обраної тематики дослідження та сформульовано мету дисертаційної роботи.

У *першому розділі* наведено огляд сучасних уявлень щодо взаємодії поверхні твердих тіл з зарядженими частинками. Показано, що найбільш перспективним підходом до іонно-плазмової модифікації поверхні є такий, що забезпечував би взаємодію потоку частинок лише з поверхнею без збурення об'єму матеріалу. Для цього необхідним є використання потоків частинок високої густини з помірною кінетичною енергією. Показано перспективність в цьому відношенні використання плазмових потоків, сформованих шляхом введення додаткової енергії до плазми через накладання зовнішніх високочастотних полів – використання геліконних джерел.

У *другому розділі* представлено результати розрахункових досліджень процесів, що відбуваються в приелектродному шарі плазми за умов накладання зовнішніх магнітних та електричних полів. Отримані результати дозволили виявити визначальну роль приелектродного шару в формуванні прискорених іонних потоків, що потрапляють на електрод високочастотного розряду перпендикулярно до магнітного поля – в приелектродній області можливе прискорення іонів до енергій, що значно перевищують теплову температуру плазми. Визначено, що напруженість зовнішнього магнітного поля є фактором, який визначає енергію іонів в плазмовому потоці.

У *третьому розділі* представлено результати дослідження зміни морфології поверхні твердих тіл під дією іонно-плазмових потоків високої густини і помірної енергії. Надано уявлення щодо послідовності процесів, що відбуваються в (при)поверхневій області матеріалу під дією такого потоку. Показано можливість формування на поверхні твердих тіл ієрархічних структур двох характерних масштабів – нанорозмірного і субмікронного. Виявлено, що в основі взаємодії поверхні з зазначеними потоками лежить перехід локальних ділянок матеріалу в квазірідинний стан. Проаналізовано вплив енергії та флюенсу іонів, потенціалу підкладинки, температури процесу та інших параметрів на зміну рельєфу поверхні твердого тіла під дією плазмо-іонної обробки. Доведено можливість формування покриттів відтворюваного хімічного складу порівняно з мішенями, які піддано розпорошенню щільними іонно-плазмовими потоками.

У *четвертому розділі* представлено результати дослідження механічних властивостей поверхонь твердих тіл, підданих обробці щільними низькоенергетичними іонно-плазмовими потоками. Виявлено, що попередня обробка поверхні дозволяє суттєво підвищити адгезію нанесеного на неї покриття порівняно з необробленим станом. Автор пов'язує даний ефект зі зміною електронних станів зі зменшенням роботи виходу електронів локальних ділянок поверхні матеріалу, які перейшли до стану квазірідини під дією іонно-плазмового потоку. Також виявлено, що іонно-плазмова обробка поверхні може обумовлювати перехід її властивостей від гідрофільних до гідрофобних. Представлено також результати, які свідчать про можливість підвищення твердості нанесених покриттів внаслідок модифікації поверхні твердого тіла іонно-плазмовим впливом.

Достовірність наукових результатів і висновків, які сформульовані у дисертаційній роботі Н.І. Семенюк, обумовлено використанням комплексу взаємно доповнюючих методів визначення властивостей і структурних характеристик поверхні твердого тіла, а саме: растрової електронної мікроскопії з енергодисперсійним рентгеноспектральним аналізом, атомно-силової мікроскопії, мас-спектрометрії вторинних іонів, склерометрії та безконтактної оптичної профілометрії. Встановлені закономірності апробовано на широкому колі твердих тіл різної природи – металах, напівпровідниках та діелектриках. Для аналізу взаємодії плазми із зовнішніми високочастотними полями застосовано також методи обчислювального експерименту. Наукові результати апробовано достатньою мірою у доповідях на конференціях та у наукових публікаціях дисертанта.

До основних **нових результатів** дисертаційної роботи, на мою думку, слід віднести наступні:

1) виявлено новий режим розпорошення поверхні твердого тіла – ефект «батурного» розпорошення, який інтерпретується як прояв переходу поверхневих шарів твердого тіла в квазірідинний стан та зміни їхніх електронних станів під дією щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків на поверхню твердого тіла без збурення об'єму матеріалу;

2) виявлено, що досягти контрольованого формування нанорозмірного або субмікронного періодичного рельєфу на поверхні твердих тіл внаслідок їх опромінення високощільними іонно-плазмовими потоками низької енергії можливо шляхом варіювання енергії та флюенсу іонів, потенціалу підкладинки та температури процесу;

3) доведено можливість відтворення хімічного складу покриття, отриманого шляхом розпорошення мішені високощільними іонно-плазмовими потоками низької енергії, порівняно зі складом самої мішені;

4) виявлено можливість підвищення адгезії осаджених покриттів до матеріалу основи шляхом попередньої обробки її поверхні щільними низькоенергетичними іонно-плазмовими потоками; даний ефект обумовлений зменшенням роботи виходу електронів в локальних поверхневих областях матеріалу, які перейшли до стану квазірідини під дією іонно-плазмової обробки;

5) визначено параметри іонно-плазмової обробки, які дозволяють суттєвим чином підвищити твердість нанесених на поверхню масивних матеріалів функціональних покриттів.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи Н.І. Семенюк обумовлена тим, що розроблені в ній фізико-матеріалознавчі підходи можуть бути використаними для створення новітніх високоефективних технологій іонно-плазмової інженерії поверхні твердих тіл для отримання стабільних покриттів з високими фізичними, механічними та функціональними властивостями. Зокрема, ці технології мають перспективу використання для створення елементів фотовольтаїки підвищеної ефективності, кремній-композитних анодів для літій-іонних акумуляторів з високими питомими характеристиками, функціонально-стабільних покриттів на внутрішніх поверхнях просторово-обмежених конфігурацій.

Апробація результатів та повнота викладення в опублікованих працях. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 10 статей, в тому числі 4 статті опубліковано в журналах, віднесених до переліку

фахових видань України, 6 статей опубліковано в наукових виданнях інших держав. Загалом 6 з цих статей опубліковано в журналах, проіндексованих наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science (3 статті опубліковано у журналах, що мають показник квартилю Q1, 1 стаття – Q2, 2 статті – Q3, відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank). Захищено 3 патенти України на корисну модель.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі літературних джерел, виконанні основного обсягу обчислювальних та експериментальних досліджень, обробці та аналізі даних та написанні статей і дисертації.

Сформульовані у дисертаційній роботі наукові **положення, висновки та узагальнення** обґрунтовані, відповідають поставленій меті роботи та її змісту. Результати дисертаційної роботи відповідають змісту опублікованих дисертантом статей. Дисертація Н.І. Семенюк «Управління морфологією та фізико-механічними властивостями поверхні твердих тіл під дією щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків» є завершеною науковою роботою, яка позбавлена принципових недоліків. Робота не містить ознак порушення принципів академічної доброчесності.

Втім, до даної дисертаційної роботи, на мою думку, слід висловити наступні зауваження та критичні коментарі:

1. в дисертаційній роботі не надано інформацію щодо обладнання та режимів його роботи, яке використовувалося для проведення експериментальних досліджень методами растрової електронної мікроскопії, мас-спектрометрії вторинних іонів, атомно-силової мікроскопії тощо.
2. висновок про відтворюваність хімічного складу розпорошених мішеней і отриманих з них покриттів, зокрема, зроблено на основі аналізу результатів, отриманих методом мас-спектрометрії вторинних іонів. Однак, представлені в роботі пошарові розподіли хімічних елементів, отримані даним методом, мають якісний характер і побудовані в координатах «інтенсивність емісії вторинних іонів – тривалість іонного травлення». Чи коректно в такому випадку робити висновок про повну відтворюваність хімічного складу?
3. В дисертації не повною мірою розкрито фізичні відмінності між «батутним» та більш традиційним каскадним механізмом розпорошення поверхні твердого тіла. Варто було би приділити цьому аспекту більше уваги, оскільки з верхньої межі іонних енергій, отриманих в геліконному джерелі, починаються «середні» енергії каскадної (парної) взаємодії.

4. В тексті дисертації зустрічається незначна кількість орфографічних помилок та одруків, також інколи трапляється відхилення форматування від вимог стандарту, що регламентує оформлення академічних текстів.

Зроблені зауваження не є принциповими і не ставлять під сумнів основні результати роботи, їх наукову і практичну значимість.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Семенюк Надії Іванівни «Управління морфологією та фізико-механічними властивостями поверхні твердих тіл під дією щільних низькоенергетичних іонно-плазмових потоків» є завершеним і самостійним науковим дослідженням, яке за актуальністю теми, її новизною та обґрунтованістю наукових результатів, що мають теоретичне та практичне значення, повністю відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013 р. (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р., №567 від 27.07.2016 р., №943 від 20.11.2019 р., №607 від 15.07.2020 р.), а її автор – Семенюк Надія Іванівна – **заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – Фізика твердого тіла.**

Офіційний опонент,
директор Навчально-наукового
інституту матеріалознавства та
зварювання імені Є.О. Патона
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
д.ф.-м.н., ст. дослідник



Ігор
ВЛАДИМИРСЬКИЙ