

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

« 29 »

Микола ШУЛЬГА

2017 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА  
навчальної дисципліни  
**Матеріалознавство модифікованої поверхні**  
Назва навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти

Доктор філософії

галузь знань

10 Природничі науки

спеціальність

104 -фізика та астрономія

освітня програма

освітньо-професійна програма «Фізика та астрономія»

спеціалізація

вид дисципліни

обов'язкова

Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій  
ІНЦ ХФТІ

Програму рекомендовано до затвердження  
Науково-технічною радою ННЦ ХФТІ

Від “ 07 ” 12 2017 року, протокол № 9

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:  
д.ф-м.н. Галина ТОЛСТОЛУЦЬКА

Програму схвалено на засіданні Науково-технічної ради Інституту  
фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій

від “ 24 ” 10 2017 року, протокол № 8

Директор Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства та  
технологій



(підпис)

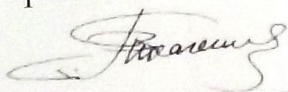
Віктор ВОЄВОДІН

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми  
«Фізика та астрономія»

назва освітньої програми

Гарант освітньо-професійної програми «Фізика та астрономія»



(підпис)

Віктор ТКАЧЕНКО

(прізвище та ініціали)

## **Вступ**

Дисципліна «Матеріалознавство модифікованої поверхні» є частиною професійної підготовки аспірантів за вибором ННЦ ХФТІ за напрямом 10 Природничі науки, за спеціальністю – 104 фізика і астрономія, яка викладається протягом другого року навчання.

## **ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**Метою** викладання навчальної дисципліни є отримання знань про закономірності і механізми процесів на поверхні твердого тіла при взаємодії з іонними пучками або плазмовими потоками та методи і технології модифікації поверхні.

**1.1 Основними завданнями** вивчення дисципліни «Матеріалознавство модифікованої поверхні» є:

- (1) засвоєння аспірантами базових знань щодо загальних уявлень про модифікацію поверхні шляхом нанесення покриттів і іонного бомбардування в вакуумі;
- (2) ознайомлення зі зміни стану поверхні при її модифікації в результаті впливу корпускулярних і електромагнітних випромінювань;
- (3) ознайомлення з основними процесами, що відбуваються при взаємодії прискорених іонів з речовиною;
- (4) оволодіння методами неруйнівного аналізу поверхонь твердих тіл іонними пучками.

## **1.2 Формування наступних компетентностей**

### **1.2.1 Формування загальних компетентностей**

Передбачається формування компетенції у сфері матеріалознавства модифікованої поверхні, а саме:

1. Уміння формулювати робочі гіпотези та моделі досліджуваної проблеми.

2. Знання методів наукових досліджень та вміння їх використовувати на належному рівні; вміння розшукувати, опрацьовувати, аналізувати та синтезувати отриману інформацію (наукові статті, науково-аналітичні матеріали, бази даних тощо).

3. Уміння здійснювати моніторинг наукових джерел інформації відносно досліджуваної проблеми.

### **1.2.2. Формування наступних спеціальних (фахових) компетентностей:**

При оволодінні дисципліною «Матеріалознавство модифікованої поверхні» передбачено формування таких фахових компетентностей як:

1. Знання сучасного стану фізики твердого тіла та матеріалознавства модифікованої поверхні, експериментальних методів вивчення пружних, пластичних, теплофізичних та електрофізичних властивостей конструкційних

матеріалів, методів аналізу дефектної структури матеріалів, залежності фізичних властивостей матеріалів від їх структури.

2. Уміння застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі матеріалознавства модифікованої поверхні.

1.3. Кількість кредитів – 4.

1.4. Загальна кількість годин – 120.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни:

Опис навчальної дисципліни «Матеріалознавство модифікованої поверхні»

| Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень |                            |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Галузь знань                                                                    | 10 – Природничі науки      |
| напрямок підготовки                                                             | 104 – фізика та астрономія |
| спеціальність                                                                   | 104 – фізика та астрономія |
| освітньо-кваліфікаційний рівень                                                 | Доктор філософії           |
| Характеристика навчальної дисципліни                                            |                            |
| Вид                                                                             | Вибір ННЦ ХФТІ             |
| Загальна кількість годин                                                        | 120                        |
| Кількість кредитів ECTS                                                         | 4                          |
| Кількість змістових модулів                                                     | 2                          |
| Форма контролю                                                                  | Іспит                      |
| Показники навчальної дисципліни                                                 |                            |
| Рік підготовки                                                                  | II                         |
| Лекційні заняття                                                                | 32                         |
| Практичні заняття                                                               | 16                         |
| Самостійна робота                                                               | 70                         |
| Консультації                                                                    | 2                          |

1.6. Очікувані результати навчання

Передбачається, що результатами навчання та опанування дисципліни мають бути наступні вміння та знання:

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми здобувачі повинні:

1. Знати та розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.

2. Знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та прикладної фізики для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з матеріалознавства модифікованої поверхні.

3. Знати та розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій.

4. Застосовувати сучасні математичні методи для побудови та аналізу математичних моделей фізичних процесів.

5. Відшуковувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність і релевантність інформації.

6. Розробляти та реалізовувати наукові та/або інноваційні інженерні проекти, які дають можливість розв'язувати значущі наукові та технологічні проблеми матеріалознавства модифікованої поверхні з врахуванням соціальних, економічних, екологічних та правових аспектів.

Після вивчення курсу здобувач повинен знати:

- ефекти глибинного зміцнення та аномально глибшого іонного проникнення, підвищення корозійної стійкості, зносостійкості і терміну служби виробів;
- відображення бомбардуючих іонів від поверхні; розпилення; механізми розпилення;
- елементний склад при великих дозах опромінення; іонний синтез; іонна металургія; іонна епітаксія;
- термічне випаровування і конденсація, катодне розпилення і конденсація, іонне осадження покриттів, іонна імплантація. Переваги і недоліки методів;
- процеси, що протікають у поверхневих шарах матеріалів на стадії опромінення і високошвидкісного охолодження при обробці поверхні низькоенергетичними потужнострумовими електронними пучками і потужними імпульсними іонними пучками;
- електроерозійний (електроіскровий) спосіб обробки деталей; електрохімічна обробка; електрохімічне полірування, ультразвукова обробка;
- вторинно-іонна мас-спектрометрія; оже-електронна спектроскопія; електронний мікрозонд; зворотне Резерфордівське розсіювання.

В результаті вивчення дисципліни аспірант повинен вміти:

- застосовувати здобуті знання для одержання, аналізу та пояснення експериментальних даних, здобутих за різних умов модифікації поверхні шляхом нанесення покриттів і іонного бомбардування;
- вибирати ту чи іншу теоретичну модель для опису фізичних процесів, які відбуваються на модифікованій поверхні;
- застосовувати потрібні методи неруйнівного аналізу поверхонь твердих тіл іонними пучками.

## **2. ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

### **Зміст навчальної дисципліни**

## **Модуль 1. Загальні уявлення про модифікацію поверхні шляхом нанесення покриттів і іонного бомбардування.**

ТЕМА 1 (2 години). Приклади зміни стану поверхні при її модифікації в результаті впливу корпускулярних і електромагнітних випромінювань в ядерних і термоядерних реакторах, космічному просторі, при промисловому виробництві. Визначення модифікації поверхні. Уявлення про процеси на поверхні: хімічні реакції; зміна топографії поверхні; сорбція атомів і іонів; дефектоутворення; імплантація; десорбція; розпилення.

ТЕМА 2 (2 години). Класифікація методів по області зміни основних параметрів, що характеризують процес взаємодії енергії та щільності струму прискорених іонів. Ефекти глибинного зміцнення та аномально глибшого іонного проникнення, підвищення корозійної стійкості, зносостійкості і терміну служби виробів.

ТЕМА 3 (6 годин). Відображення бомбардуючих іонів від поверхні; розпилення; механізми розпилення; визначення коефіцієнтів розпилення, залежність коефіцієнта розпилення від кута падіння, енергії, маси і атомного номера частинок.

ТЕМА 4 (6 годин). Зміна елементного складу при великих дозах опромінення; іонний синтез; іонна металургія; іонна епітаксія. Іонна очистка; іонне перемішування; іонне зміцнення; іонне ущільнення; іонне травлення. Створення радіаційно-індукованих фаз; іонно-стимульована сегрегація; зміна електронного стану поверхні.

## **Модуль 2. Методи модифікації поверхні.**

ТЕМА 5 (4 години). Термічне випаровування і конденсація, катодне розпилення і конденсація, іонне осадження покриттів, іонна імплантація. Переваги і недоліки методів.

ТЕМА 6 (2 години). Електронно-променеве зварювання; термічна електронно-променева обробка; електронно-променеве випаровування; електронно-променева плавка.

ТЕМА 7 (4 години). Процеси, що протікають в поверхневих шарах матеріалів на стадії опромінення і високошвидкісного охолодження при обробці поверхні низькоенергетичними потужнострумовими електронними пучками і потужними імпульсними іонними пучками (ППП); лазерні технології для отримання мікро- і наноструктур на поверхні металів. Послідовність процесів оплавлення і затвердіння поверхневого шару макроскопічної товщини;

ТЕМА 8 (3 години). Електроерозійний (електроіскровий) спосіб обробки деталей; електроіскрова обробка профільованим і непрофільованим електродами; електроімпульсна обробка; височастотна електроіскрова обробка; електрохімічна обробка; ультразвукова обробка.

ТЕМА 9 (3 години). Вторинно-іонна мас-спектрометрія (зондування прискореними іонами в поєднанні з мас-спектрометричним аналізом продуктів розпилення); Оже-електронна спектроскопія (зондування потоком прискорених електронів в поєднанні з реєстрацією емітованих оже-електронів); електронний мікрозонд (заснований на реєстрації характеристичного рентгенівського випромінювання, що генерується твердим тілом під дією потоку електронів); зворотне Резерфордівське розсіювання (визначення енергетичних втрат при розсіюванні легких прискорених іонів).

### Структура навчальної дисципліни

| Назва лекції                                                                                                        |        |                               |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------|-------------------|
|                                                                                                                     | Лекції | Практичні/семінарські заняття | Самостійна робота |
| Змістовний модуль 1. Загальні уявлення про модифікацію поверхні шляхом нанесення покриттів і іонного бомбардування. |        |                               |                   |
| Тема 1. Процеси на поверхні твердого тіла при взаємодії з іонними пучками або плазмовими потоками.                  | 2      | 2                             | 8                 |
| Тема 2. Класифікація методів вакуумної технології.                                                                  | 2      | 2                             | 9                 |
| Тема 3. Основні процеси, що відбуваються при взаємодії прискорених іонів з речовиною.                               | 6      | 2                             | 9                 |
| Тема 4. Модифікація властивостей твердих тіл іонним бомбардуванням.                                                 | 6      | 2                             | 9                 |
| Разом за змістовний модуль 1                                                                                        | 16     | 8                             | 35                |
| Змістовний модуль 2. Методи модифікації поверхні.                                                                   |        |                               |                   |
| Тема 5. Іонно-вакуумні технології нанесення покриттів.                                                              | 4      | 2                             | 7                 |
| Тема 6. Основи електронно-променевої                                                                                | 2      | 2                             | 7                 |

|                                                                                  |    |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|
| обробки матеріалів.                                                              |    |    |    |
| Тема 7. Модифікація поверхні при впливі на поверхню інтенсивних потоків енергії. | 4  | 0  | 7  |
| Тема 8. Електрофізичні методи обробки матеріалів.                                | 3  | 0  | 7  |
| Тема 9. Неруйнівний аналіз поверхонь твердих тіл іонними пучками.                | 3  | 4  | 7  |
| Разом за змістовний модуль 2                                                     | 16 | 8  | 35 |
| Всього                                                                           | 32 | 16 | 70 |

Загальний обсяг: 120 год., зокрема: лекцій – 32 год.; практичних/семінарів – 16 год., самостійної роботи – 70 год., консультацій – 2 год.

#### 4. Тематичний план практичних та семінарських занять

| № з/п | Тема                                                                                                                                                                         | Години |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1     | Визначення методом Монте-Карло (Програма SRIM):<br>– коефіцієнтів розпилення;<br>– енергії атомів віддачі; енергії іонізації;                                                | 2      |
| 2     | Ефекти зміцнення та способи їх вимірювання;                                                                                                                                  | 2      |
| 3     | Визначення коефіцієнтів іонно-електронної емісії                                                                                                                             | 2      |
| 4     | Аналіз літератури щодо процесів під час іонної очистки, іонного перемішування, іонного ущільнення та іонного травлення. Обмеження в застосуванні методів іонної імплантації. | 2      |
| 5     | Метод магнетронного розпилення. Метод вакуумно-дугового осадження. Схеми та суть.                                                                                            | 2      |
| 6     | Визначення гальмівної здатності речовини і пробігу електронів та енергія збудження і кутового розсіювання                                                                    | 2      |
| 7     | Метод ядерних реакцій; Скануюча тунельна і атомно-силова мікроскопія;<br>Оптична спектроскопія.                                                                              | 4      |

|  |        |    |
|--|--------|----|
|  |        |    |
|  | Всього | 16 |

### 5. Самостійна робота

| № з/п | Тема                                                                                              | Години |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1     | Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 1 розділу. | 35     |
| 2     | Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 2 розділу. | 35     |
|       | Всього                                                                                            | 70     |

### Запитання до іспиту

1. Технології модифікації поверхні. Фізичні ефекти, що спостерігаються в матеріалах, залежно від енергії падаючих іонів. Чинники, які є визначальними під час модифікації поверхні.
2. Типи процесів розпилення. Порогова енергія розпилення. Механізм розпилення внаслідок теплових піків та лінійних каскадів.
3. Процеси, які обумовлюють хімічне розпилення. Параметри, від яких залежить коефіцієнт хімічного розпилення.
4. Схема та принцип роботи методу термічного випаровування та конденсації. Типи росту тонких плівок під час термічного випаровування. Методи нагрівання при вакуумному випаровуванні.
5. Схема та принцип роботи методу катодного розпилення. Різновиди методу катодного розпилення.
6. Схема та принцип роботи методу іонної імплантації. Відмінність іонної імплантації від традиційних способів введення домішки. Іонний синтез.
7. Механізми формування структури матеріалу при опроміненні потужними імпульсними пучками.
8. Як створюються концентровані потоки енергій і для чого вони використовуються. За якої обробки утворюється аморфна структура, механізм її утворення.
9. Який ефект використовується під час обробки поверхні імпульсними концентрованими потоками енергій.
10. Електронно-променеве плавлення. Електронно-променеве випаровування. Принципова схема електроіскрової обробки.
11. Лазерна модифікація поверхні та її практичне застосування.
12. Види радіаційних технологій.

## 6. Методи контролю

Поточний контроль складається з:

- 1) активної участі в аудиторних заняттях;
- 2) контрольні роботи;
- 3) експрес-контроль на практичних заняттях.

Підсумковий контроль проводиться в формі іспиту (ваговий бал – 40)

## 7. Схема нарахування балів

Матеріал курсу «Матеріалознавство модифікованої поверхні» згідно навчальної програми містить 9 тем. Темі розподілені по модулях відповідно: I модуль – 4 теми (від 1 до 4), II модуль – 5 тем (від 5 до 9). Оцінка роботи здобувачів проводиться за модульно-рейтинговою системою і включає такі види роботи над курсом: практичні роботи, засвоєння теоретичного матеріалу та домашні завдання.

| Теми за курсом |          |         | Разом |
|----------------|----------|---------|-------|
| Модуль 1       | Модуль 2 | Екзамен | 100   |
| T1-T4          | T5-T9    |         |       |
| 30             | 30       |         |       |

T1, T2 ... - теми розділів.

Оцінка за модуль складається з оцінки за практикум, поточний контроль, виконання домашніх письмових завдань. Здобувачі повинні виконати та оформити всі практичні роботи.

Здобувачі пишуть відповідно до кожного модуля письмові контрольні роботи, кожна з яких оцінюється максимум 10-ма балами. Решта 20 балів – це середня оцінка поточного контролю за відповідними темами, колоквіуми (усні), самостійні письмові роботи і т. ін.

Для допуску до підсумкового семестрового контролю здобувач в сумі за практикум, поточний контроль, виконання домашніх письмових завдань має набрати не менше 30-ти балів з 60-ти можливих, тобто не менше 50% від максимально можливого.

На екзамені здобувач може одержати від 20 до 40 балів. Між 0 та 20 балами оцінка не виставляється, екзамен вважається не зданим. Бали, одержані на екзамені від 20 до 40 додаються до балів, одержаних у семестрі (30-60 балів). За цією сумою згідно таблиці шкали оцінювання виставляється підсумкова оцінка до залікової книжки.

### Шкала оцінювання

| Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру | Оцінка                              |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                                | за чотирирівневою шкалою оцінювання |
| 90-100                                                         | відмінно                            |

|       |              |
|-------|--------------|
| 70-89 | добре        |
| 50-69 | задовільно   |
| 1-49  | незадовільно |

### **Критерії оцінювання**

#### **питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)**

Екзаменаційний білет (контрольна робота) містить кілька завдань (теоретичні питання або задачі). Кожне завдання має свій ваговий бал (вказується у дужках біля питання) та оцінюється окремо. Сумарно за всі відповіді на екзаменаційні питання можна отримати максимально 40 балів. Сумарний бал за контрольну роботу вказується в тексті відповідної роботи.

|  | Характеристика відповіді на кожне з питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)                                                                                              | % від max балу за відповідь на питання |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|  | Повна та вірна відповідь на питання або у повному обсязі правильно вирішена практична задача білету                                                                                 | 100 %                                  |
|  | Повна відповідь з незначними помилками (або незначні помилки у розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули);                                           | 80-95 %                                |
|  | Неповна, але вірна відповідь (або значні помилки у розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули для розв'язання практичних завдань);                    | 50-80 %                                |
|  | Відповідь повна, але містить грубі помилки (або вирішення практичних завдань білету містить грубі помилки, розрахункові формули для розв'язання практичних завдань містять помилки) | 30-50 %                                |
|  | Неповна відповідь з суттєвими помилками                                                                                                                                             | 5-30 %                                 |
|  | Невірна відповідь                                                                                                                                                                   | 0-5 %                                  |
|  | Відсутня відповідь на теоретичне питання (або відсутнє вирішення практичних завдань білету)                                                                                         | 0 %                                    |

### **9. Рекомендована література**

#### **Основна література**

1. Болеста І. Фізика твердого тіла / Л.: Вид-во відділу ЛНУ ім. Франка, 2003. – 479 с.
2. Функціональні матеріали і покриття: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів / [М.О. Азаренков та ін.]: Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. –Х.: ХНУ, 2013. – 206 с.
3. О.М. Дубовий, Ю.О. Казимиренко, Н.Ю. Лебедєва, С.М. Самохін. Інженерне матеріалознавство: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Миколаїв: НУК, 2009. – 444с.

4. П.О. Киричок, Т.А. Роїк, А.С. Морозов. Основи металознавства і порошкової металургії: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / К. НТУУ «КПІ», 2012, 128с.
5. О.В. Сушко, С.В. Кюрчев. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / Навч. посіб. - Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2010.- 232 с.
6. В.М. Клименко, О.П. Шиліна, А.Ю. Осадчук. Технологія конструкційних матеріалів / Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.- 97 с. ISBN 966-641-156-3
7. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М.А. Сологуб, І.О. Рожнецький, О.І. Некоз та ін. – К.: Вища школа, 2002. – 374 с.
8. В.І. Савуляк, В.Й. Шенфельд. Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 124 с.
9. В.І. Савуляк. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 161 с.
10. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» // 2017 р. Луцьк: Луцький НТУ, 2017. Випуск 11(2).

#### Допоміжна література

1. Was Gary S. Fundamentals of Radiation Materials Science. Springer 2007. <https://www.springer.com/gp/book/9783540494720>.
2. Prokopenko G.I., Mordyuk B.M., Vasyliiev M.O., Voloshko S.M. Fizychni Osnovy Ul'trazvukovogo Udarnogo Zmitsnennya Metalevykh Poverkhon' (Physical Principles for Ultrasonic Impact Hardening of Metallic Surfaces). Kyiv: Naukova Dumka, 2017 (in Ukrainian).

Розробник програми  
д.ф.-м.н., проф.



Галина ТОЛСТОЛУЦЬКА