



## Теорія процесів формування структури та властивостей напилених покриттів

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>132 Матеріалознавство</i>
Освітня програма	<i>Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>4 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити/120 год: лекції – 36 год, практичні заняття – 18 год, СРС – 66 год.</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік/МКР</i>
Розклад занять	<i><a href="http://rozklad.kpi.ua/">http://rozklad.kpi.ua/</a></i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: д.т.н., професор Смірнов Ігор Володимирович Практичні заняття: д.т.н., професор Смірнов Ігор Володимирович</i>
Розміщення курсу	<i>Campus</i>

#### Програма навчальної дисципліни

##### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Напилені покриття широко застосовується в різних галузях промисловості для захисту поверхонь різних деталей від зношування, а також від корозії в агресивних середовищах. Крім цього, технологія напилювання дозволяє відновлювати зношені деталі машин і механізмів, що дає значну економію матеріалів. Вивчатися в дисципліні будуть процеси утворення парової та крапельно-газової фаз, транспортування матеріалів на поверхню, на яку наносяться покриття, і утворення покриттів. Набуті знання дозволять вільно орієнтуватися в технологічних особливостях напилення.

Метою навчальної дисципліни є підсилення у студентів фахових компетенцій спеціальності таких як:

- Здатність застосовувати системний підхід до вирішення інженерних матеріалознавчих проблем.
- Здатність обирати технологічний процес та його оптимальні умови для отримання виробів з композиційних, наноструктурованих та порошкових матеріалів.
- Здатність застосовувати сучасні підходи оптимізації та дизайну матеріалів для удосконалення їх властивостей залежно від умов експлуатації.

**Предмет** навчальної дисципліни: фізико – хімічні процеси утворення взаємодії парових потоків, які використовуються при напиленні покриттів різного призначення; теплові і кінетичні процеси при взаємодії напилених матеріалів з тепловими потоками; процеси взаємодії напилених матеріалів з поверхнею, на яку наносять покриття.

### **Результати навчання:**

- Знати та вміти використовувати знання фундаментальних наук, що лежать в основі відповідної спеціалізації матеріалознавства, на рівні, необхідному для досягнення інших результатів освітньої програми.
- Знати можливості сучасних CAD/CAM/CAE систем для розробки оптимальних технологічних процесів напilenня.

## **2. Пререквізити та пост реквізити дисципліни**

Дисципліни, знання з яких необхідні для вивчення дисципліни:

- Фізика;
- Хімія;
- Фізика конденсованого стану матеріалів;
- Математичне і комп'ютерне моделювання.

Знання, що студент отримує під час вивчення дисципліни «Теорія процесів формування структури та властивостей напilenих покриттів» необхідні студентам для підготовки звітів з переддипломної практики та дипломного проєктування. Результати вивчення дисципліни є складовою інтегральної компетентності підготовки за освітньо-професійною програмою першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

**Вступ. Організація очного/дистанційного навчання**

**Розділ 1. Значення захисних покриттів для різних областей техніки.**

Завдання, які вирішуються з використанням напilenих покриттів. Класифікація покриттів. Газотермічні і вакуумно-конденсаційні покриття.

**Розділ 2. Загальна характеристика способів нанесення покриттів**

Класифікація газотермічних способів напilenня. Електродугова металізація. Загальні закономірності електродугової металізації. Електрична дуга, як джерело нагріву розпиляемого матеріалу. Газополум'яне напilenня. Плазмове напilenня. Утворення і склад низькотемпературної плазми. Плазмовий струмінь як джерело нагріву напilenяємих частинок. Знаходження вихідних характеристик плазмового струменя. Зміна вихідних характеристик плазмового струменя. Загальні закономірності детонаційно-газового напilenня. Механізм детонаційно-газового перетворення. Кінетика детонаційно-газового перетворення. Прискорення частинок при детонаційно-газовому напilenні.

**Розділ 3. Закономірності формування потоку частинок при газотермічному напilenні**

Основні стадії газотермічного напilenня. Нагрів і прискорення частинок матеріалів в газовому струмені. Особливості формування потоку частинок при порошковому і проволочному способах напilenня. Зміна температури і швидкості газового потоку і частинок, що напilenюються. Основні залежності і рівняння для розрахунку розміру розпилюємих частинок.

**Розділ 4. Утворення та структура газотермічних покриттів**

Взаємодія частинок з напilenюваною поверхнею. Процеси які проходять в зоні контакту. Визначення енергії активації для утворення міцних зв'язків. Схема деформації частинок при зустрічі з основою. Напорний і імпульсний тиски. Механізм фізико-хімічних процесів, які забезпечують утворення міцних зв'язків. Виникнення фізичного і хімічного контактів в зоні взаємодії. Умови формування покриття в різних точках пята напilenня. Фігура напilenня. Особливості формування структури покриття та її характеристика. Причина утворення і характеристика дефектів структури.

**Розділ 5. Вакуумно конденсаційне напilenня.**

Класифікація способів вакуумно конденсаційного напilenня. Фізико-хімічні основи процесу випаровування чистих металів, сплавів і сполук. Рівняння Ленгмюра. Правило Рауля. Катодне розпилення. Формування потоку напilenяємих частинок. Атомарний, молекулярний, іонізований та змішані потоки. Наявність в паровому потоці агрегатів атомів, молекул і капельної фази. Енергія напilenих частинок. Способи її збільшення. Адсорбція частинок на поверхні напilenня. Фізична адсорбція і хемосорбція. Термічна акомодация атомів напilenюемого матеріалу. Процеси

зародження і росту напилюємих покриттів. Розмір критичного зародку нової фази і його залежність від матеріалів покриття. Формування структури покриття. Тризонна модель. Характеристика розміру кристалів та вплив на форму температури поверхні і дифузійної активності атомів.

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

##### Базові:

1. Білик І. І. Технологія та обладнання напилених покриттів : навчальний посібник / І. І. Білик. – Київ : Політехніка, 2004. – 101 с.
2. Дубовий О. М. Технологія напилювання покриттів : підручник / О. М. Дубовий, А. М. Степанчук. – Миколаїв : НУК, 2007. – 236 с.
3. Корж В. М. Нанесення покриттів : навчальний посібник / В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко. – Київ : Арістей, 2005. – 150 с.
4. Обладнання та технологія напилених покриттів : методичні вказівки до лабораторних робіт по курсу / уклад.: І. І. Білик. – Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2003. – 36 с.

##### Додаткові:

1. Корж В. М. Технологія та обладнання для напилювання : навчальний посібник / В. М. Корж. – Київ : НМЦВО, 2000. – 152 с.
2. Білик І. І. Технологія та обладнання напилених покриттів : навчальний посібник / І. І. Білик. – Київ : Політехніка, 2002. – 101 с.
3. Азаренко А. А. Структура и свойства защитных покрытий и модифицированных слоев материалов / А. А. Азаренко, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк. – Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразин, 2007. – 576 с.

##### Інформаційні ресурси

1. [www.scincedirect.com](http://www.scincedirect.com)
2. <http://www.tspc.ru>
3. <http://www.dimet.com.ua>.

Зазначені базові навчальні матеріали є у вільному доступі у бібліотеці КПІ і мережі інтернет.

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни.

#### 5.1. Лекційні заняття

##### **Розділ 1. Значення захисних покриттів для різних областей техніки.**

Лекція 1. Вступ. Організація очного/дистанційного навчання. Значення захисних покриттів для різних областей техніки. Завдання які вирішуються з використанням напилених покриттів. Класифікація покриттів. Газотермічні і вакуумно-конденсаційні покриття.

##### **Розділ 2. Загальна характеристика способів нанесення покриттів**

Лекція 2. Класифікація газотермічних способів напилення. Електродугова металізація. Загальні закономірності електродугової металізації. Електрична дуга, як джерело нагріву розпиляемого матеріалу. Газополум'яне напилення.

Лекція 3. Плазмове напилення. Утворення і склад низькотемпературної плазми. Плазмовий струмінь як джерело нагріву напіляємих частинок. Знаходження вихідних характеристик плазмового струменя. Зміна вихідних характеристик плазмового струменя.

Лекція 4. Загальні закономірності детонаційно-газового напилення. Механізм детонаційно-газового перетворення. Кінетика детонаційно-газового перетворення. Прискорення частинок при детонаційно-газовому напиленні.

### **Розділ 3. Закономірності формування потоку частинок при газотермічному напиленні**

Лекція 5. Основні стадії газотермічного напилення.

Лекція 6. Нагрів і прискорення частинок матеріалів в газовому струмені. Особливості формування потоку частинок при порошковому і проволочному способах напилення.

Лекція 7. Зміна температури і швидкості газового потоку і частинок, що напилуються. Основні залежності і рівняння для розрахунку розміру розпилюємих частинок.

### **Розділ 4. Утворення та структура газотермічних покриттів**

Лекція 8. Взаємодія частинок з напилюваною поверхнею. Процеси які проходять в зоні контакту. Визначення енергії активації для утворення міцних зв'язків.

Лекція 9. Схема деформації частинок при зустрічі з основою. Напорний і імпульсний тиски. Механізм фізико-хімічних процесів, які забезпечують утворення міцних зв'язків. **МКР**

Лекція 10. Виникнення фізичного і хімічного контактів в зоні взаємодії. Умови формування покриття в різних точках пята напилення. Фігура напилення.

Лекція 11. Особливості формування структури покриття та її характеристика. Причина утворення і характеристика дефектів структури.

### **Розділ 5. Вакуумно конденсаційне напилення.**

Лекція 12. Класифікація способів вакуумно конденсаційного напилення. Фізико-хімічні основи процесу випаровування чистих металів, сплавів і сполук. Рівняння Ленгмюра. Правило Рауля.

Лекція 13. Катодне розпилення. Формування потоку напилюємих частинок. Атомарний, молекулярний, іонізований та змішані потоки. Наявність в паровому потоці агрегатів атомів, молекул і капельної фази.

Лекція 14. Загальні відомості про теорії іонного розпилення.

Лекція 15. Енергія напилених частинок. Способи її збільшення. Адсорбція частинок на поверхні напилення. Фізична адсорбція і хемосорбція.

Лекція 16. Термічна акомодация атомів напилюємого матеріалу. Процеси зародження і росту напилюємих покриттів.

Лекція 17. Розмір критичного зародку нової фази і його залежність від матеріалів покриття. Формування структури покриття. Тризонна модель. Характеристика розміру кристалів та її вплив на температуру поверхні і дифузійну активності атомів.

Лекція 18. **Залік.**

## **5.2. Практичні заняття**

Основні завдання циклу практичних занять є отримання практичних навичок для розрахунку теплофізичних процесів, що мають місце при напилюванні покриттів.

№ з/п	Назва практичної роботи (комп'ютерного практикуму)	Кількість ауд. годин
1.	Розрахунок параметрів розпилення дроту плазмовим струменем.	2
2.	Визначення ступені деформації частинок при ударі об основу.	2
3.	Розподілу характеристик плазмового струменя.	2
4.	Визначення коефіцієнта використання матеріалів при газотермічному напилюванні.	2
5.	Розрахунок внутрішніх напружень у системі основа-покриття для газотермічного напилювання.	2
6.	Розрахунки швидкості випаровування металів, сплавів і сполук при	2

	вакуумному нанесенні покриттів.	
7.	Дослідження структури покриттів, отримуваних в вакуумі.	2
8.	Параметри процесу одержання покриттів реактивним напилюванням.	2
9.	Розрахунок швидкості плазмового стуменя.	2

## 6. Самостійна робота студентів (66 год)

1. Підготовка до лекцій 29 год.
2. Підготовка до практичних занять 27 год.
3. Робота над темами, що виносяться на самостійне опрацювання 6 год.

№№	Тема для самостійного працювання
1.	Загальні закономірності газофазного висадження. Основні методи хімічного випаровування. Схема випаровування.
2.	Внутрішні напруження в газотермічних покриттях. Види напружень. Способи регулювання напруги в покриттях. Схема утворення залишкових напружень на сферичних поверхнях.
3.	Загальні характеристики теорій розпилення матеріалів іонним пучками.

4. Підготовка до модульної контрольної роботи 4 год.
5. Підготовка до заліку 6 год.

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни.

**Правила відвідування занять.** Відвідування лекційних занять є бажаним, хоча і не обов'язковим. Відвідування лекційних занять дозволить студентам не тільки опанувати теоретичні знання безпосередньо на лекції, але і задати викладачу питання, що виникають під час викладання матеріалу лекції. Відвідування практичних занять є обов'язковим.

**Правила поведінки на заняттях.** На усіх заняттях, лекційних і практичних вітається відключення звукових сигналів телефонів. Під час проведення практичних робіт у очному режимі в лабораторії №024-9 корпус і студенти повинні суворо дотримуватись правил техніки безпеки.

Умовою допуску до виконання практичної роботи є наявність у студента написаного протоколу. За дистанційної форминавчання студенти отримують індивідуальний доступ до завдання для практичної роботи за адресою даною викладачем і не пізніше тижня після виконання роботи надсилають викладачу оформлений звіт. Перевірка здійснюється викладачем упродовж наступного тижня.

Перескладання заліку проводиться під час додаткової сесії за положенням НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" відповідно до графіку перескладань оприлюдненому на сайті ІМЗ ім. Є. О. Патона.

Усі учасники освітнього процесу: викладачі і здобувачі в процесі вивчення дисципліни мають керуватись принципами академічної доброчесності, передбаченими «Кодексом честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»» <https://kpi.ua/code>.

### 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

#### Види контролю

- Поточний контроль: практичні роботи, модульна контрольна робота (МКР).
- Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.
- Семестровий контроль: залік.

Кожний вид робіт оцінюється за 100-бальною шкалою. Коефіцієнти вагомості наведено у формулі:

$$O_{\text{семестр}} = 0,5 \sum O_{\text{пр}} / 9 + 0,5 \cdot O_{\text{МКР}}$$

### **Критерії нарахування балів.**

До кожної практичної роботи студент повинен підготувати протокол, який складається із:

- номера;
- назви;
- мети;
- теоретичних відомостей, до яких включають основні визначення та умовні позначення;
- порядок виконання.

За дистанційної форми навчання на передодні заняття студенти відправляють написаний відруки протокол викладачу для перевірки. На занятті студенти допускаються до тестів з теорії практичної роботи. Упродовж тижня студенти оформляють протокол практичної роботи відповідно до вимог завдання і надсилають на перевірку викладачу. Кожна виконана і оформлена практична робота оцінюється максимально у 100 балів за такими критеріями:

- підготовлений до практичної роботи протокол у відповідності до вимог – 10 балів;
- знання теорії роботи – 30 балів;
- виконання роботи, проведення розрахунків за результатами досліду та їх обговорення – 50 балів;
- оформлення результатів відповідно до вимог і захист – 10 балів.

Штрафні бали призначаються за:

- відсутність протоколу – 10 балів;
- протокол, що не відповідає вимогам – 5 балів;
- несамостійна робота на лабораторному занятті – 5 балів.

Ваговий коефіцієнт оцінювання результатів виконання практичних робіт складає 0,5.

### **Модульна контрольна робота**

На проведення роботи відводиться 2 академічні година. Студенти отримують завдання, що складається із 2 теоретичних питань (Додаток А). За дистанційної форми навчання студенти отримують доступ до тестового завдання у GoogleClassRoom, куди ж завантажують виконане завдання для перевірки. Максимально робота оцінюється у 100 балів із ваговим коефіцієнтом 0,5.

### **Календарний контроль**

Календарний контроль (КК) проводиться на 7-8 та 14-15 тижнях семестру навчання. Для позитивного оцінювання 1-го КК студенту необхідно оформити і захистити 4 ПР щонайменше на 50 балів і отримати мінімум 50 балів за МКР. Для позитивного оцінювання 2-го КК студенту необхідно отримати мінімум по 50 балів за інші практичні роботи.

### **Залік**

Умовою допуску до заліку є виконання усіх практичних робіт і написання МКР щонайменше на 60 балів. Студенти, що набрали упродовж семестру не менше 60 балів, як середнє від суми усіх виконаних завдань, мають можливість отримати оцінку, згідно таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	залік
94-85	залік
84-75	залік
74-65	залік
64-60	залік

Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

*Для підвищення рейтингової оцінки студент може написати залікову контрольну роботу, але у цьому випадку попередній рейтинг студента скасовується і він отримує оцінку з урахуванням результатів тільки залікової контрольної роботи, згідно таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою.*

*Залікова контрольна робота проводиться усно. Студент отримує 2 питання, відповіді на які максимально оцінюються у 100 балів (50 балів за правильну відповідь на кожне питання), відповідно:*

- *100-95 балів – повна відповідь, не менше 90 % потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», (повне, безпомилкове розв'язування завдання);*
- *90-85 балів – достатньо повна відповідь, не менше 80 % потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь або є незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями);*
- *85-70 балів – неповна відповідь, не менше 60 % потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками);*
- 0 балів – відповідь не відповідає умовам до «задовільно».*

#### **9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

- *Результати навчання за даною дисципліною здобуті у неформальній/інформальній освіті, зокрема із використанням відкритих навчальних он-лайн курсів (Prometeus, Coursera тощо), визнаються за умови одержання відповідних сертифікатів. При цьому може бути перерахований як освітній компонент повністю, так і його окремі складові (змстовні модулі, окремі теми, окремі практичні заняття). Можливість перерахування (відповідність змісту дисципліни) та обсяг навчальних годин визначається викладачем для кожного конкретного випадку і здійснюється за процедурою, яка відповідає "Положенню про визнання в КПІ ім. Ігоря Сікорського результатів навчання, набутих у неформальній/інформальній освіті".*
- *Питання до модульної контрольної роботи наведено у Додатку А.*

#### **Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено** професор, д.т.н. Смірнов Ігор Володимирович

**Ухвалено** кафедрою ВТМ та ПМ (протокол № 17 від 22 червня 2024 р.)

**Погоджено** Методичною комісією ІМЗ ім. Є. О. Патона (протокол № 12/24 від 28 червня 2024 р.)

Приклади завдань  
для Модульної контрольної роботи

Завдання 1

1. Термодинаміка випаровування чистих металів.
2. Твердофазний метод дифузійного насичення.

Завдання 2

1. Загальні закономірності вакуумного конденсаційного напилювання.
2. Розрахунок напружень в покриттях.

Завдання 3

1. Термодинаміка випарування сплавів.
2. Зміни тиску у зоні контакту частки з основою.

Завдання 4

1. Катодне розпилення.
2. Формування структури вакуумних покриттів.

Завдання 5

1. Кінетика випарування сплавів.
2. Реакційне напилювання.

Завдання 6

1. Кінетика випарування хімічних сполук.
2. Взаємодія потоку атомів з основою при ВКН

Завдання 7

1. Катодне розпилення.
2. Температура контакту частки з основою.

Завдання 8

1. Взаємодія потоку атомів з основою при ВКН.
2. Температура контакту частки з основою.

Завдання 9

1. Термодинамічний підхід до утворення зародків конденсації.
2. Кінетика випаровування сплавів.

Завдання 10

1. Ріст кристалів вакуумних покриттів.
2. Кінетика випаровування сплавів.

Завдання 11

1. Формування структури вакуумних покриттів.
2. Визначення розміру часток при розпиленні проволоки.

Завдання 12

1. Особливості термо-вакуумного випарування сплавів.
2. Структура дифузійних покриттів.



#### Завдання 13

1. Реактивне напилення сполук.
2. Визначення розміру часток при розпиленні проволоки.

#### Завдання 14

1. Кінетика випарування чистих металів.
2. Стадії дифузійного насичення.

#### Завдання 15

1. Кінетика випаровування сплавів.
2. Температура контакту частки з основою.

#### Завдання 16

1. Кінетика випаровування хімічних сполук.
2. Температура контакту частки з основою.

#### Завдання 17

1. Термодинаміка випаровування чистих металів.
2. Утворення плазмового потоку.

#### Завдання 18

1. Термодинаміка випаровування сплавів.
2. Теорії іонного розпилення.

#### Завдання 19

1. Утворення плазмового потоку.
2. Температура контакту частинки з основою.

#### Завдання 20

1. Термодинаміка випаровування хімічних сполук.
2. Утворення плазмового потоку.

#### Завдання 21

1. Катодне розпилення.
2. Напруження в газо термічних покриттях.

Питання, що виносяться на залік

1. Утворення та склад низькотемпературної плазми.
2. Загальні закономірності вакуумного конденсаційного напилювання.
3. Плавлення порошкових частинок в газовому струмені.
4. Детонаційно-газове напилювання.
5. Кінетика випарування хімічних сполук.
6. Утворення детонаційної хвилі.
7. Катодне розпилення.
8. Структура газотермічних покриттів.
9. Взаємодія потоку атомів з основою при ВКН.
10. Розрахунок напружень в покриттях.
11. Ріст кристалів вакуумних покриттів.
12. Розпилення проволочи високотемпературним струменем.
13. Формування структури вакуумних покриттів.
14. Утворення хімічного контакту (ГТН).
15. Процес формування покриттів (ГТН).
16. Реакційне напилення сполук.
17. Зміни тиску у зоні контакту частки з основою.
18. Кінетика випарування чистих металів.
19. Плазмове напилення.
20. Кінетика випаровування сплавів.
21. Визначення розміру часток при розпиленні проволочи.
22. Загальні закономірності електродугової металізації.
23. Температура контакту частки з основою.
24. Термодинаміка випаровування сплавів.
25. Теорії іонного розпилення.
26. Формування шару покриттів.
27. Утворення плазмового потоку.
28. Термодинаміка випаровування хімічних сполук.
29. Загальні закономірності газополуменового напилення.
30. Напруження в газо термічних покриттях.
31. Коефіцієнт використання матеріалів.
32. Взаємодія напилюваного порошку з газовим потоком.
33. Утворення детонаційної хвилі.
34. Визначення початкових характеристик плазмового струменя.
35. Внутрішнє напруження в покриттях.