



# Процеси формування структурита 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)/змішана/дистанційна</i>
Рік підготовки, семестр	<i>3 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити/120 год: лекції –36 год, практичні заняття –36 год, СРС –48 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 Смирнов Ігор Володимирович Практичні заняття: д.т.н., професор Смирнов Ігор Володимирович</i>
Розміщення курсу	<i>classroom</i>

### Програма навчальної дисципліни

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

*Знання фізико-хімічних процесів, які мають місце у формуванні покриттів, взаємодії частинок порошку, що напилюються з високотемпературним газовим потоком, формування структури покриттів, а також технології наплення, дозволять створювати покриття з заданими властивостями.*

*Вивчатися в дисципліні будуть процеси утворення двофазних та парових потоків, які використовуються у напленні покриттів різного призначення; теплові та кінетичні процеси при взаємодії напилених матеріалів з тепловими потоками; процеси взаємодії напилених матеріалів з поверхнею, на яку наносять покриття; процеси формування фізико-механічних властивостей напилених покриттів.*

*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 часні ідходи оптимізації та дизайну матеріалів для удосконалення їх властивостей залежно від умов експлуатації.*

*Предмет навчальної дисципліни: процеси формування структури покриттів отриманих газотермічним та вакуумно-конденсаційним напленням; теплові і кінетичні процеси при*

взаємодії напилених матеріалів з тепловими потоками; процеси взаємодії напилених матеріалів з поверхнею, на яку наносять покриття; фізико-механічні властивості напилених покриттів.

#### **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 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 напилених покриттів. Класифікація покриттів. Газотермічні і вакуумно-конденсаційні покриття.

#### **Розділ 2. Процеси формування структури газотермічних покриттів**

Класифікація газотермічних способів напilenня. Загальні закономірності електродугової металізації. Газополуменеve напilenня. Плазмове напilenня. Загальні закономірності детонаційно-газового напilenня.

Взаємодія частинок з напильованою 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 3. Утворення та структура вакуумно-конденсаційних покриттів**

Класифікація способів вакуумно конденсаційного напilenня. Процеси випаровування чистих металів, сплавів і сполук. Катодне розпилення. Формування потоку напильованих частинок. Енергія напилених частинок. Способи її збільшення. Адсорбція частинок на поверхні напilenня. Фізична адсорбція і хемосорбція. Термічна акомодация атомів напильованого матеріалу. Процеси зародження і росту напильованих 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.

#### **Розділ 4. Фізико-механічні властивості газотермічних та вакуумно-конденсаційних покриттів**

Методики визначення фізичних властивостей покриттів (щільність, пористість, електропровідність, термічна стабільність тощо). Методики визначення механічних властивостей напилених покриттів (мікротвердість, міцність зчеплення, трищійністійкість, скретч тест). Визначення трибологічних властивостей напилених покриттів. Спеціальні

методи визначення функціональних властивостей напилених покриттів (ерозійна стійкість, корозійна стійкість, фретинг корозія тощо).

#### **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:**

5. Корж В. М. *Технологія та обладнання для напилювання : навчальний посібник / В. М. Корж. – Київ : НМЦВО, 2000. – 152с.*
6. Білик І. І. *Технологія та обладнання напилених покриттів : навчальний посібник / І. І. Білик. – Київ : Політехніка, 2002. – 101 с.*
7. 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)
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. Значення захисних покриттів для різних областей техніки. Завдання які вирішуються з використанням напилених покриттів.

Лекція 2. Класифікація покриттів за різними фізико-технологічними ознаками. Газотермічні і вакуумно-конденсаційні покриття.

#### **Розділ 2. Процеси формування структури газотермічних покриттів**

Лекція 3. Класифікація газотермічних способів напилення. Загальні закономірності електродугової металізації. Газополуменеве напилення. Плазмове напилення. Загальні закономірності детонаційно-газового напилення.

Лекція 4. Взаємодія частинок з напилюваною поверхнею. Процеси які проходять в зоні контакту. Визначення енергії активації для утворення міцних зв'язків.

Лекція 5. Механізм деформації частинок під час удару з основою. Напорний і імпульсний тиски.

Лекція 6. Механізм фізико-хімічних процесів, які забезпечують утворення міцних зв'язків. Виникнення фізичного і хімічного контактів в зоні взаємодії. Умови формування покриття в різних точках пятна напилення.

Лекція 7. Особливості формування структури покриття та її характеристика. Причина утворення і характеристика дефектів структури. Фігура напилення.

#### **Розділ 3. Утворення та структура вакуумно-конденсаційних покриттів**

Лекція 8. Класифікація способів вакуумно конденсаційного напилення. Фізико-хімічні основи процесу випаровування чистих металів, сплавів і сполук. Рівняння Ленгмюра. Правило Рауля.

Лекція 9. Катодне розпилення. Формування потоку напиляємих частинок. Атомарний, молекулярний, іонізований та змішані потоки. Наявність в паровому потоці агрегатів атомів, молекул і капельної фази.

Лекція 10. Загальні відомості про теорії іонного розпилення.

Лекція 11. Енергія напилених частинок. Способи її збільшення. Адсорбція частинок на поверхні напилення. Фізична адсорбція і хемосорбція.

Лекція 12. Термічна акомодация атомів напилюемого матеріалу. Процеси зародження і росту напилюємих покриттів.

Лекція 13. 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.

#### **Розділ 4. Фізико-механічні властивості газотермічних та вакуумно-конденсаційних покриттів**

Лекція 14. Методики визначення фізичних властивостей покриттів (щільність, пористість, електропровідність, термічна стабільність, тощо).

Лекція 15. Методики визначення механічних властивостей напилених покриттів (мікротвердість, міцність зчеплення, трищіностійкість, скретч тест).

Лекція 16. Визначення трибологічних властивостей напилених покриттів (зносостійкість, коефіцієнт тнртя, тощо).

Лекція 17. Спеціальні методи визначення функціональних властивостей напилених покриттів (ерозійна стійкість, корозійна стійкість, фретинг корозія, тощо).

Лекція 18. Способи підвищення фізико-механічних властивостей напилених покриттів.

#### **5.2. Практичні заняття**

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

№ з/п	Назва практичної роботи (комп'ютерного практикуму)	Кількість ауд. годин
1.	Організація очного/дистанційного навчання. Рейтингова система оцінювання	2
2.	Визначення коефіцієнту використання матеріалу за газотермічного напилювання.	4
3.	Визначення ступеня деформації частинок під час удару об поверхню основи.	4
4.	Дослідження структури газотермічних покриттів.	4
5.	Розрахунок внутрішніх напружень у системі основа-покриття для газотермічного напилювання.	6
6.	Визначення мікротвердості напилених покриттів.	4
7.	Визначення міцності зчеплення газотермічних покриттів.	4
8.	Визначення пористості газотермічних покриттів	4
9.	Модульна контрольна робота.	2
10.	Залік	2

#### **6. Самостійна робота студентів (48 год)**

1. Підготовка до лекцій 9 год.
2. Підготовка до практичних занять 7 год.

3. Робота над темами, що виносяться на самостійне опрацювання 22 год.

№	Тема для самостійного опрацювання
1.	Загальні закономірності газофазного осадження. Основні методи фізичного випаровування. Схема випаровування у вакуумі.
2.	Загальні характеристики розпилення матеріалів іонними пучками.
3.	Внутрішні напруження в газотермічних покриттях. Види напружень. Способи регулювання напружень в покриттях. Схема утворення залишкових напружень на циліндричних поверхнях.
4.	Визначення міцнісних характеристик зразків з покриттями в умовах вигину.
5.	Розрахунок та моделювання адгезійно-когезійних властивостей системи основа- покриття.

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 корпусі студенти повинні суворо дотримуватись правил техніки безпеки.

Умовою допуску до виконання практичної роботи є наявність у студента написаного протоколу. За дистанційної форми навчання 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 НН 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.

**Умови допуску до семестрового контролю:** виконання практичних занять та написання МКР щонайменше на 60 балів.

#### Поточний контроль

- Активність на лекціях оцінюється ваговим балом – 2. Максимальна кількість балів на



всіх лекціях складає:  $2 \text{ бали} \times 17 = 34 \text{ бали}$ .

- Виконання практичних занять оцінюється ваговим балом – від 1 до 6. Максимальна кількість балів за всі практичні заняття складає:  $6 \text{ балів} \times 7 = 42 \text{ бали}$ .
- Виконання модульної контрольної роботи оцінюється – від 1 до 24 балів.  
На проведення роботи відводиться 2 академічні години. 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. Відповідь на кожне питання оцінюється від 1 до 6 балів. Максимальна кількість балів за МКР складає:  $6 \text{ балів} \times 2 = 12 \text{ балів}$ , відповідно за дві модульні контрольні 24 бали.

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:

$$RC = 34 + 42 + 24 = 100 \text{ балів.}$$

### **Календарний контроль**

Календарний контроль (КК) проводиться на 7-8 та 14-15 тижнях семестру навчання. Для позитивного оцінювання 1-го КК студенту необхідно оформити та захистити практичні роботи та написати МКР №1. Для позитивного оцінювання 2-го КК студенту необхідно написати позитивно МКР №2.

### **Залік**

Умовою допуску до залікує 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.

**Залікова семестрова контрольна робота** пропонується у разі набору студентом недостатньої для семестрової атестації кількості балів (від 40 до 59 балів) або у разі незгоди студента із кількістю балів набраних протягом семестру.

Критерії оцінки :

Залікова контрольна робота складається з 10 теоретичних та практичних питань.

Правильна відповідь на кожне оцінюється в 10 балів ( $10 \times 10 = 100$  балів).

Шкала оцінювання кожного із 10 теоретичних питань:

0 - відповідь невірна або відсутня;

1-3 – відповідь частково (на 30%) вірна.

4-6 – відповідь частково (на 60%) вірна.

7-9 – відповідь частково (на 90%) вірна.

10 - відповідь правильна і повна.

Величина шкали залікової контрольної роботи  $R = 100$  балів.

Для підвищення рейтингової оцінки студент може скласти 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».

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

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

- Питання до модульної контрольної роботи наведено у додатку А.
- Питання які виносяться на залікову контрольну роботу наведені у додатку Б.
- 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 перезарахований як освітній компонент повністю, так і його окремі складові (змістовні модулі, окремі теми, окремі практичні заняття). Можливість перезарахування (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".

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

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

**Ухвалено** кафедрою ВТМ та ПМ (протокол № 9 від 14 лютого 2025 р.)

**Погоджено** Методичною комісією НН ІМЗ ім. Є. О. Патона (протокол № 6/25 від 19 лютого 2025 р.)

**Приклади завдань  
для Модульної контрольної роботи**

**Завдання 1**

1. Термодинаміка випаровування чистих металів.
2. Визначення мікротвердості газотермічних покриттів.

**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 частинки з основою.

**Завдання 4**

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

**Завдання 5**

1. Кінетика випарування сплавів.
2. Формування структури газотермічних покриттів.

**Завдання 6**

1. Характеристики плазмового напилення.
2. Взаємодія потоку атомів з основою при ВКНП.

**Завдання 7**

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

**Завдання 8**

1. Взаємодія частинки з основою при ГНП.
2. Визначення зносостійкості напилених покриттів.

**Завдання 9**

1. Термодинамічний підхід до утворення зародків конденсації.
2. Визначення пористості напилених покриттів.

**Завдання 10**

1. Ріст кристалів вакуумних покриттів.
2. Визначення корозійної стійкості напилених покриттів.

**Завдання 11**

1. Основні види 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. Структуро утворення газотермічних покриттів.
2. Визначення ерозійної стійкості газотермічних покриттів.

#### Завдання 14

1. Стадії дифузійного насичення.
2. Визначення когезійної міцності напилених покриттів.

#### Завдання 15

1. Типи сплетів при газотермічному напиленні.
2. Визначення адгезійної міцності напилених покриттів.

#### Завдання 16

1. Формоутворення вакуумно-конденсаційних покриттів.
2. Визначення коефіцієнту тертя напилених покриттів.

#### Завдання 17

1. Утворення двофазного газопорошкового потоку при плазмовому напиленні.
2. Визначення корозійної стійкості напилених покриттів

#### Завдання 18

1. Закономірності іонного розпилення.
2. Визначення коефіцієнту використання матеріалу при газотермічному напиленні.

#### Завдання 19

1. Деформація частинки при ударі з основою.
2. Залишкові напруження в газо термічних покриттях.

#### Завдання 20

1. Мікроструктура композиційних покриттів.
2. Визначення тріщиностійкості газотермічних покриттів.

Питання, щовиносяться на залік

1. Термодинаміка випаровування чистих металів.
2. Загальні закономірності вакуумного конденсаційного напилювання.
3. Термодинаміка випарування сплавів.
4. Катодне розпилення.
5. Кінетика випарування сплавів.
6. Характеристики плазмового напилення.
7. Катодне розпилення.
8. Взаємодія частинки з основою при ГНП.
9. Термодинамічний підхід до утворення зародків конденсації.
10. Ріст кристалів вакуумних покриттів.
11. Закономірності іонного розпилення.
12. Основні види структури вакуумних покриттів.
13. Особливості термо-вакуумного випарування сплавів.
14. Визначення розміру часток при розпиленні проволочи.
15. Структура дифузійних покриттів.
16. Структура утворення газотермічних покриттів
17. Стадії дифузійного насичення.
18. Формоутворення вакуумно-конденсаційних покриттів.
19. Утворення двофазного газопорошкового потоку при плазмовому напиленні.
20. Визначення мікротвердості газотермічних покриттів.
21. Розрахунок напружень в покриттях.
22. Зміни тиску у зоні контакту частинки з основою.
23. Формування структури вакуумних покриттів.
24. Формування структури газотермічних покриттів.
25. Взаємодія потоку атомів з основою при ВКНП.
26. Температура контакту частинки з основою.
27. Визначення зносостійкості напилених покриттів.
28. Визначення пористості напилених покриттів.
29. Визначення корозійної стійкості напилених покриттів.
30. Визначення ерозійної стійкості газотермічних покриттів.
31. Визначення когезійної міцності напилених покриттів.
32. Типи сплетів при газотермічному напиленні.
33. Визначення адгезійної міцності напилених покриттів.
34. Визначення коефіцієнту тертя напилених покриттів.
35. Визначення корозійної стійкості напилених покриттів
36. Визначення коефіцієнту використання матеріалу при газотермічному напиленні.
37. Деформація частинки при ударі з основою.
38. Залишкові напруження в газо термічних покриттях.
39. Мікроструктура композиційних покриттів.
40. Визначення тріщиностійкості газотермічних покриттів.