



МЕХАНІЗМИ ТА КІНЕТИКА МАСОПЕРЕНОСУ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>132 Матеріалознавство</i>
Освітня програма	<i>Матеріалознавство</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна) / дистанційна / змішана</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>5 кредитів ECTS (150 год.), лекції – 36 год., практичні – 18 год., СРС – 96 год.</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Екзамен, МКР</i>
Розклад занять	https://Rozklad.kpi.ua
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лекції: Волошко С.М., професор, д.ф.-м.н. Практичні: Волошко С.М., професор, д.ф.-м.н. (063) 075-95-52 - Telegram та Viber voloshko@kpm.kpi.ua; voloshkosvetlana13@gmail.com</i>
Розміщення курсу	https://classroom.google.com/c/NjUzODEwMTq3MjE0?cjc=tpakfuc
Програма навчальної дисципліни	

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

Навчальна дисципліна належить до переліку дисциплін циклу професійної підготовки освітньої програми другого рівня вищої освіти – магістра з матеріалознавства та складається з одного кредитного модулю.

Предмет навчальної дисципліни: Базові уявлення стосовно механізмів і кінетики масопереносу в моно-, полі- та нанокристалічних матеріалах у рамках феноменологічної та атомної теорій.

Особливість подання цієї проблематики студентам спеціалізації: особливістю подання матеріалу є наголос на плануванні і виконанні дифузійних досліджень, обробці результатів експерименту з використанням основних положень термодинаміки, інформаційних технологій, правильній інтерпретації результатів натурних або модельних експериментів; опануванні фізичних моделей процесів масопереносу.

Мета та завдання навчальної дисципліни

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів компетентностей у відповідності до ОПП, а саме:

Загальні компетентності (ЗК)	
K3.01	Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу
K3.02	Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях
Фахові компетентності спеціальності (ФК)	
СК.05	Здатність до критичного аналізу та прогнозування характеристик нових та існуючих матеріалів, параметрів процесів їх отримання і обробки та використання у виробі (або у виробничих умовах)
СК.09	Здатність обґрунтовано здійснювати вибір технологій виготовлення, оброблення, випробування матеріалів і виробів, для конкретних умов експлуатації

СК.19	Здатність використовувати закони термодинаміки та кінетики фазових і хімічних перетворень, масопереносу для розробки технологічних процесів виробництва матеріалів
-------	--

Основні завдання навчальної дисципліни.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння кредитного модулю мають продемонструвати такі програмні результати навчання:

PH1	Розуміти та застосовувати принципи системного аналізу, причинно-наслідкових зв'язків між значущими факторами та науковими і технічними рішеннями в контексті існуючих теорій
PH2	Виявляти, формулювати і вирішувати матеріалознавчі проблеми і задачі
PH3	Вільно спілкуватись державною та англійською мовами усно і письмово для обговорення професійних проблем і результатів діяльності у сфері матеріалознавства та ширшого кола інженерних питань, презентації результатів досліджень та інноваційних проєктів
PH4	Застосовувати сучасні інформаційні технології та спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання складних задач матеріалознавства
PH5	Приймати ефективні рішення в нових ситуаціях або непередбачуваних умовах з урахуванням їх можливих наслідків, оцінювати і порівнювати альтернативи, оцінювати технічні, економічні, екологічні та правові ризики
PH6	Наукові навички у галузі інженерії для того, щоб успішно проводити наукові дослідження як під керівництвом так і самостійно
PH11	Використовувати сучасні методи для виявлення, постановки та розв'язування винахідницьких задач в галузі матеріалознавства
PH12	Формулювати та розв'язувати науково-технічні задачі для розробки, виготовлення, випробування, сертифікації, утилізації матеріалів, створення та застосування ефективних технологій виготовлення виробів
PH13	Планувати і виконувати експериментальні матеріалознавчі дослідження, обирати відповідні обладнання та методики, здійснювати статистичну обробку і статистичний аналіз результатів експериментів, обґрунтовувати висновки
PH15	Проектувати нові матеріали, розробляти, досліджувати та використовувати фізичні та математичні моделі матеріалів та процесів
PH17	Розв'язувати прикладні задачі виготовлення, обробки, експлуатації та утилізації матеріалів та виробів
PH19	Розробляти комплексний дизайн нових матеріалів і виробів на їх основі з урахуванням експлуатаційних властивостей та умов використання
PH 20	Розробляти і застосовувати новітні методи і методики досліджень матеріалів та процесів в галузі матеріалознавства з урахуванням особливості проблем, що вирішуються
PH 21	Застосовувати сучасні математичні методи, цифрові технології та спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання складних задач і проблем матеріалознавства

Алгоритми дій в стандартних професійних ситуаціях:

Працюючи особисто із використанням даних щодо хімічного складу матеріалу або його компонентів, їх структури та властивостей, а також режимів термічної обробки за допомогою обчислювальної техніки та відомих теоретичних моделей студент зможе проводити швидку оцінку коефіцієнтів дифузії та визначати їх залежність від концентрації, розраховувати енергію активації процесу, аналізувати динаміку розвитку дифузійних процесів та концентраційний розподіл компонентів у різні моменти часу, встановлювати закономірності кінетики і механізмів дифузії в твердих тілах; проводити комп'ютерне імітаційне моделювання дифузійних процесів.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Дисципліна базується на курсах бакалаврської підготовки по спеціальності Матеріалознавство. В свою чергу дисципліна є базовою для освітнього компоненту "Науково-дослідна практика".

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Масоперенос в однорідних середовищах.

Вступ. Предмет і завдання дисципліни.

Тема 1.1. Рівняння тепло- та масопереносу у найбільш загальному вигляді.

Тема 1.2. Розв'язки другого рівняння Фіка.

Тема 1.3. Кінетика масопереносу. Вплив різних факторів.

Розділ 2. Механізми масопереносу.

Тема 2.1. Масоперенос границями зерен та потрійними стиками границь зерен.

Тема 2.2. Поверхневий масоперенос.

Тема 2.3. Масоперенос у багатофазних системах.

Тема 2.5. Атомні механізми масопереносу.

Розділ 3. Спеціальні аспекти масопереносу

Тема 3.1. Сучасні експериментальні методики.

Тема 3.2. Аномальний масоперенос.

Тема 3.3. Дифузія в рідких металах та сплавах.

Тема 3.4. Висхідна дифузія. Ефект Горського.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

(усі видання наявні в бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського або в електронному вигляді за посиланням <https://classroom.google.com/c/NjUzODEwMTg3MjE0?cjc=tpakfuc>).

1. **Підручник.** Теорія тепло- та масопереносу в матеріалах [текст] : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 132 «Матеріалознавство», освітньою програмою «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» (протокол Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського № 6 від 7 вересня 2020 р.) / автори: С.І. Сидоренко, С.М. Волошко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 220 с.
2. **Навчальний посібник.** Термодинаміка та кінетика дифузії [текст] : навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; автори: С.І. Сидоренко, С.М. Волошко. – Київ: Вид-во «САК ЛТД», 2020. – 103 с.
3. **Навчальний посібник.** Аномальне масоперенесення [текст] : навч. посіб. для підготовки докторів філософії за освітньо-науковою програмою «Матеріалознавство / КПІ ім. Ігоря Сікорського; укладачі : С.І. Сидоренко, О.В. Філатов, С.М. Волошко, І.О. Круглов. – Київ : Вид-во «САК ЛТД», 2020. – 82 с.
4. **Навчально-методичний посібник.** Зерногранична дифузія в нанокристалічних матеріалах з ієрархічною структурою [текст] : укладачі С.І. Сидоренко, С.М. Волошко. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2014. – 95 с.
5. **Методичні вказівки.** Комп'ютерне моделювання процесів тепло- та масопереносу в металах та сплавах / укладачі : С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 54 с.

Додаткова література

6. Структура і властивості металів [Електронний ресурс] : **конспект лекцій** для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» (освітня програма «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання») / Серія «Педагогічне надбання : Ларіков Л.Н.»; укладачі: Сидоренко С.І., Волошко С.М.; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,98 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 362 с.

7. **Навчальний посібник.** Сучасні експериментальні методики фізичного матеріалознавства [текст] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою “Металофізичні процеси та їх комп’ютерне моделювання” спеціальності 132 “Матеріалознавство” / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Волошко С.М., Крутько О.А., Франчік Н.В. – Київ: Видав-во «Навчальна література», 2020. – 100 с.
8. **Навчальний посібник.** Сучасні експериментальні методи аналізу низькорозмірних структур: навч. посіб. для студ. Спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Інжиніринг та комп’ютерне моделювання в матеріалознавстві» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; укладачі : М.В. Карпець, С.І. Сидоренко, А.П. Бурмак. – Київ : Вид-во «САК ЛТД», 2021. – 113 с.
9. С.І. Сидоренко, Л.М. Березовська, С.М. Волошко. Математичне моделювання процесів дифузії – Київ: Наукова Думка, 2007. – 324 с.
10. Сидоренко С.І., Васильєв М.О., Волошко С.М. Дифузія в металевих плівках з мікро- та нанорозмірною структурою – Київ: Наукова думка, 2011. – 567 с.
11. Сидоренко С. І., Волошко С.М., Макогон Ю.М. Матеріалознавство тонкоплівкових наноструктур. Дифузія та реакції – Київ, Наукова думка, 2000. – 207 с.
12. Белоус М.В. Васильєв М.А. Іващенко Є.В. Сидоренко С. І., Холмська Г.Д. Будова рідких, аморфних та кристалічних матеріалів. – **Електронний підручник** з грифом Міністерства освіти України для студентів вищих навчальних закладів III – IV рівнів акредитації. – 1998. – 32Мб.
13. **Електронний підручник.** С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, С.О. Замулко, Г.Д. Холмська. «Теорія тепло- та масопереносу в матеріалах». – 2011. – 7,38 МБ (рекомендований методичною радою НТУУ «КПІ»).
14. **Навчальний посібник.** С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, С.І. Конорев, Г.Д. Холмська, С.О. Замулко, Ю.В. Нестеренко «Інформаційні та комунікаційні технології у науковій діяльності матеріалознавця», Київ: НТУУ «КПІ», 2013 – 53 с.

Студент має ознайомитись з цими ресурсами зважаючи на конкретні теми дисципліни.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<p>Лекція 1. Вступ. Предмет і завдання дисципліни.</p> <p>Предмет, завдання курсу. Місце курсу в комплексі наук фізичного матеріалознавства. Стислий огляд основних питань, що будуть розглядатися. Основні поняття теорії дифузії. Феноменологічний та мікроскопічний опис. Значення дифузії в твердих тілах. Історія розвитку теорії дифузії. Дослід Робертс-Аустена. Теорія Френкеля.</p>
2,3	<p>Лекція 2. Рівняння тепло- та масопереносу у найбільш загальному вигляді.</p> <p>Рівняння теплопровідності Фур’є. Перше рівняння Фіка (декартова системи координат). Загальні уявлення про рушійні сили дифузії у твердих тілах. Типи коефіцієнтів дифузії. Коефіцієнти гетеро- і самодифузії. Коефіцієнти дифузії як скалярні і тензорні величини. Інтегральні та диференціальні форми рівняння балансу речовини. Перше рівняння Фіка для випадку наявності додаткової рушійної сили.</p> <p>Лекція 3. Рівняння тепло- та масопереносу у найбільш загальному вигляді. Друге рівняння Фіка. Рівняння теплопровідності Фур’є. Тепло- і температуропровідність. Залежність коефіцієнту дифузії від температури. Закон Арреніуса. Енергія активації дифузії. Кореляційні співвідношення для самодифузії. Залежність енергії активації від температури плавлення. Коефіцієнт теплового розширення. Логарифмічна метаморфоза залежності α від температури плавлення.</p> <p>Основна література: [1], [2]. Додаткова література: [6], [9], [13].</p>

	<p>Завдання на СРС: Рівняння Фіка (циліндрична та сферична системи координат). Коефіцієнти дифузії як скалярні і тензорні величини. Оператори дивергенції, градієнту, Лапласа.</p>
4, 5	<p>Лекція 4. Постановка початково-крайових задач тепло- та масопереносу. Стаціонарні і нестаціонарні задачі. Початкові та крайові умови – Діріхле (I роду), Неймана (II роду) та Ньютона (III роду). Аналітичні методи розв'язання другого рівняння Фіка. Метод розділення змінних. Операційний метод. Метод джерел. Основні типи розв'язків 2-го рівняння Фіка. Джерелоподібні розв'язки, розв'язки у вигляді функції помилок, розв'язки з експонентами, розв'язки для стаціонарних задач.</p> <p>Лекція 5. Розв'язки другого рівняння Фіка. Розв'язки рівняння Фіка (загальні положення). Дифузія в необмежений зразок з миттєвого джерела. Дифузія в необмежений зразок з шару визначеної товщини. Дифузія в напівобмежений зразок з іншого напівобмеженого зразка. Дифузія в напівобмежений зразок крізь поверхню. Дифузія в пластину крізь поверхню. Дифузія у складній пластині. Розв'язки стаціонарних задач – дифузія в кулі, дифузія в циліндрі.</p> <p>Основна література: [1], [2]. Додаткова література: [6], [9], [13].</p> <p>Завдання на СРС: Метод моделювання. Розв'язок задачі Коші для другого рівняння Фіка. Властивості функції помилок, таблиці та графіки, ймовірнісні діаграми.</p>
6,7	<p>Лекція 6. Кінетика масопереносу сірки в аустенітній сталі. Масоперенос сірки в сталі аустенітного класу X20H16AG6 під час термічної обробки. Масоперенос сірки в сталі X20H16AG6 за умов одновісного розтягу за підвищених температур. Роль границь зерен. Практичне використання розв'язків 2-го рівняння Фіка для розрахунку енергії активації.</p> <p>Лекція 7. Загальні кінетичні закономірності масопереносу. Вплив різних факторів. Температура. Основні емпіричні правила. Тиск. Бародифузійний ефект. Тип твердого розчину. Валентність. Стан кристалічної структури. Час. Розмір зерна. Деформація кристалічної ґратки. Поліморфні перетворення.</p> <p>Основна література: [1], [2]. Додаткова література: [6], [12].</p> <p>Завдання на СРС: Червоноламкість сталі. Розрахунок енергії активації за експериментальними даними.</p>
8-10	<p>Лекція 8. Масоперенос границями зерен. Основні визначення. Будова границь зерен. Модель ізольованої границі Фішера. Особливості масопереносу у тонких плівках. Розвиток математичної теорії зернограничної дифузії. Модель Судзуоки для набору ідеальних границь. Модель сферичних зерен. Модель реального полікристалу Левіна-Маккалума. ґратка співпадаючих вузлів. Дифузійно-індукована міграція границь зерен (DIGM). Дифузійно-індукована рекристалізація зерен (DIR). Типи кінетики зернограничного масопереносу.</p> <p>Лекція 9. Масоперенос потрійними стиками границь зерен. Польовий йонний мікроскоп Мюллера. Атомно-зондова томографія. Масоперенос у наноплівках. Роль потрійних стиків границь зерен. Кінетичні режими, ієрархія шляхів дифузії. Ширина границь зерен. Температурна залежність ширини границь зерен.</p> <p>Лекція 10. Особливості масопереносу в нанокристалічних матеріалах (НКМ). Архітектурні матеріали – біоміметика, літоміметика. Нанокристалічні та наноструктурні матеріали. Особливості нанокристалічних матеріалів. Розмірний ефект. Кермети, наноламінати, МАХ-фази. Модель ієрархічної будови НКМ. Масоперенос у нанокристалічному сплаві Fe-40Ni, одержаному методом порошкової металургії.</p> <p>Основна література: [1], [2], [3]. Додаткова література: [10], [11].</p> <p>Завдання на СРС: Методи одержання об'ємних НКМ та властивості. Типи кінетики масопереносу. Класифікації Харісона, Дивинського.</p>

11	<p>Лекція 11. Поверхневий масоперенос. Двомірні дефекти кристалічної будови. Поверхня реального кристалу. Енергія утворення адатомів. Поверхнева само- та гетеродифузія. Механізми поверхневої дифузії. Ефект Ребіндера. Метод поверхневого накопичення. Розрахунок коефіцієнтів поверхневої дифузії за даними спектральних методів. Метод Фогеля.</p> <p>Основна література: [1], [2].</p> <p>Додаткова література: [6], [7], [8].</p> <p>Завдання на СРС: Математичні методи визначення коефіцієнтів поверхневої дифузії. Застосування методу вторинно-іонної мас-спектрометрії для визначення коефіцієнтів поверхневої дифузії. Метод Фогеля. Методика експерименту.</p>
12	<p>Лекція 12. Масоперенос у багатофазних системах. Атомна та реакційна дифузія. Кінетика взаємної дифузії та росту фаз. Фактори, які впливають на швидкість зростання фаз. Моделі реакційної дифузії: модель молекулярної дифузії Фрі, модель початкової дифузії та наступної реакції, модель початкової реакції та наступної дифузії, острівцева модель Л.Н. Ларікова. Фрактальні структури. Кінетичні аномалії. Розмірно-індукована реакційна дифузія у бінарній твердофазній системі. Фізичні причини розмірно-індукованої залежності коефіцієнта дифузії.</p> <p>Основна література: [1], [2].</p> <p>Додаткова література: [12], [13].</p> <p>Завдання на СРС: Методи розрахунку концентраційної залежності коефіцієнтів дифузії: метод Грубе-Еделе. Метод Матано-Больцмана. Аналітичні методи розрахунку концентраційної залежності коефіцієнтів дифузії: метод Хола, метод Любова-Максимова.</p>
13	<p>Лекція 13. Атомні механізми масопереносу. Механізми масопереносу – простий обмінний; циклічний обмінний; простий міжвузловий; міжвузловий механізм витіснення; вакансійний; краудійний. Вплив дефектів кристалічної ґратки на масоперенос. Рівноважна концентрація вакансій. Джерела і стоки вакансій. Дифузія і випадкові блукання. Ефекти Кіркендала і Френкеля. Теорія Бардіна-Херинга. Приклади моделювання масопереносу за різними механізмами. Утворення пор, ріст пор, міграція пор, пастки для пор на границях зерен під час електроміграції. Формування пор у процесі окиснення наночастинок. Нанооболонки.</p> <p>Основна література: [1], [2], [4].</p> <p>Додаткова література: [10], [12].</p> <p>Завдання на СРС: Залежність коефіцієнтів дифузії від величини зерна. Кінетика масопереносу в монокристалічних, полікристалічних та нанокристалічних матеріалах.</p>
14, 15	<p>Лекція 14. Сучасні експериментальні методики. Радіометричні методи. Синхротронний аналіз. Класифікації експериментальних методів. Радіоактивність, ізотопи та ізобари. Типи випромінювання. Закон радіоактивного розпаду. Метод зняття шарів. Абсорбційний метод. Авторадіографічний метод. Закон Вегарда. Дослідження масопереносу методом рентгеноструктурного аналізу. Синхротронне випромінювання. Приклади дифузійного дослідження. Переваги синхротронного випромінювання.</p> <p>Лекція 15. Сучасні експериментальні методики. Спектральні методи. Трансмісійна електронна мікроскопія <i>in-situ</i>. Порівняльна характеристика різних методів. Електронна Оже-спектроскопія. Растрова електронна мікроскопія. Приклади експериментальних досліджень. Мапи розподілу хімічного складу за товщиною. Мас-спектрометрія вторинних іонів. Метод Резерфордівського зворотного розсіювання. Трансмісійна електронна мікроскопія <i>in-situ</i>. Методика <i>cross-sectional</i>. Приклади дослідження кінетики масопереносу.</p> <p>Основна література: [1], [1].</p> <p>Додаткова література: [7], [8].</p>

	Завдання на СРС: Сутність рентгеноструктурного аналізу. Дифракція рентгенівських променів на кристалічній ґратці. Закон Вульфа-Брега. Метод рентгенівської фотоелектронної спектроскопії.
16	Лекція 16. Аномальний масоперенос. Явище аномального масопереносу – закономірності та механізми. Структурні рівні масопереносу. Макроструктурний рівень. Мікроструктурний підхід. Наноструктурний атомно-кінетичний підхід. Основні методи ік імпульсних навантажень. Ударне механічне навантаження, його характерні параметри. Навантаження ударними та пружними хвилями, його характерні параметри. Методи вивчення розподілу атомів, засновані на застосуванні радіоактивних ізотопів. Вплив швидкості деформації. Вплив температури. Вплив типу кристалічної ґратки. Атомні механізми аномального масопереносу. Основна література: [3]. Додаткова література: [11]. Завдання на СРС: Аномальний масоперенос у нанокристалічних матеріалах. Вплив масопереносу на фазоутворення під дією імпульсної обробки, формування фаз, що не відповідають діаграмам фазової рівноваги. «Механічна» дифузія Руоффа.
17	Лекція 17. Дифузія в рідких металах та сплавах. Дифузія в рідинах. Дірковий механізм дифузії. Рівняння Фіка. Теорія Ейнштейна для стохастичних процесів. Теорія Я.І. Френкеля. Модель дифузії в рідині П.П. Кобеко. Теорія вільного об'єму М. Кохіна та Д. Тернбала. Теорія Свеліна. Залежність коефіцієнтів дифузії від температури та маси атома. Методи розрахунку коефіцієнтів дифузії – капілярні, метод диска з рівнодоступною поверхнею, що обертається. Основна література: [3]. Додаткова література: [12]. Завдання на СРС: Модель теплового руху в рідких металах. Текучість. Електрохімічні методи визначення коефіцієнтів дифузії – хронопотенціометричний, гальваностатичний, похибки.
18	Лекція 18. Висхідна дифузія. Ефект Горського. Явище висхідної дифузії, історія спостережень. Дослід Гегузіна із вигнутою пластинкою. Релаксація Горського. Інтеркристалітний ефект Горського. Рівноважна сегрегація. Аномальна міграція електронів у металах. Чому "метал вибухає". Кінетика поверхневої сегрегації під впливом зовнішніх дій в аморфних сплавах. Основна література: [2], [3]. Додаткова література: [6], [12]. Завдання на СРС: Аномальний масоперенос в системах метал-водень, прояв ефекту Горського.

Практичні заняття

Основні завдання циклу практичних занять полягають у формуванні у студентів практичних навичок і умінь вирішувати дифузійні задачі, у тому числі за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання.

№ з/п	Назва теми практичного заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Рівняння тепло- та масопереносу у найбільш загальному вигляді. Постановка початково-крайових задач. <i>Мета роботи</i> – 1) Ознайомлення з інтерфейсом електронного підручника «Теорія тепло- та масопереносу в матеріалах» (гіпертекстовий механізм організації навчальної інформації, дидактичні одиниці підручника (розділи, теми), словник фізичних термінів, механізм тестування для перевірки і самоперевірки набутих знань. 2) Самостійне формулювання початкових, граничних умов та умов сполучання процесів розповсюдження тепла в різних тілах (стрижень, циліндр, шар тощо) та масопереносу.

	<p>Основна література: [2] С. 4 – 23.</p> <p>Завдання на СРС: Опанувати електронний підручник і теоретичні відомості. Розв'язати задачі. Зробити висновки.</p>
2	<p>Розв'язки другого рівняння Фіка. Метод моделювання.</p> <p><i>Мета роботи</i> – змоделювати концентраційні розподілення за 10-ма розв'язками 2-го рівняння Фіка для різних параметрів використовуючи комп'ютерну тренажерну програму.</p> <p>Додаткова література: [14].</p> <p>Завдання на СРС: Опанувати теоретичні відомості. Виконати моделювання. Проаналізувати отримані дані та зробити висновки.</p>
3	<p>Розв'язки другого рівняння Фіка. Одномірні задачі.</p> <p><i>Мета роботи</i> – використання розв'язків 2-го рівняння Фіка для розв'язання практичних задач масопереносу.</p> <p>Модульна контрольна робота – 1 частина.</p> <p>Основна література: [2] С. 30 – 41.</p> <p>Завдання на СРС: Опанувати теоретичні відомості. Виконати необхідні розрахунки. Зробити висновки.</p>
4	<p>Наближені методи розв'язування задач дифузії в необмежених областях. Функція помилок.</p> <p><i>Мета роботи</i> – використання розв'язку задачі Коші для 2-го рівняння Фіка у вигляді “функції помилок” для розв'язання задач масопереносу, тобто визначення концентрації дифундуючої речовини на деякій відстані від поверхні за різний час відпалу, товщини дифузійного шару та значень коефіцієнтів дифузії. Набуття практичних навичок щодо користування табульованими значеннями “функції помилок”.</p> <p>Основна література: [2] С. 47 – 49.</p> <p>Завдання на СРС: Опанувати теоретичні відомості. Виконати необхідні розрахунки. Зробити висновки.</p>
5	<p>Розв'язання задач масопереносу з використанням ймовірнісних діаграм та номограм. Метод “серединного градієнту” Холла-Морабито.</p> <p><i>Мета роботи</i> – отримання практичних навичок для швидкої оцінки коефіцієнтів взаємної дифузії за допомогою ймовірнісних діаграм, номограм Гелера та Хола-Морабито. Опанування графічного методу розрахунку коефіцієнтів об'ємної дифузії за концентраційними профілями з врахуванням початкового (до термообробки) масопереносу.</p> <p>Основна література: [2] С. 49 – 57.</p> <p>Завдання на СРС: Опанувати теоретичні відомості. Виконати необхідні розрахунки. Зробити висновки.</p>
6	<p>Масоперенос границями зерен, модель ізольованої границі Фішера. Визначення параметрів зернограничної дифузії.</p> <p><i>Мета роботи</i> – Розв'язання дифузійних задач на основі розв'язків 2-го рівняння Фіка в рамках моделі ізольованої границі зерна, запропонованої Фішером; розрахунок коефіцієнтів зернограничної дифузії.</p> <p>Модульна контрольна робота – 2 частина.</p> <p>Основна література: [2] С. 68 – 71.</p> <p>Завдання на СРС: Опанувати теоретичні відомості щодо методів визначення коефіцієнтів зернограничної дифузії. Виконати необхідні розрахунки. Зробити висновки.</p>
7	<p>Поверхневий масоперенос, методи Хванга-Баллуфі та Фогеля.</p> <p><i>Мета роботи</i> – Розрахунок коефіцієнтів дифузії за кінетичними залежностями поверхневої концентрації дифундуючої речовини (метод поверхневого накопичення Хванга-Баллуфі) та за даними вторинно-іонної мас-спектрометрії (метод Фогеля).</p> <p>Основна література: [2] С. 61 – 65.</p>

	Завдання на СРС: Опанувати теоретичні відомості щодо методів визначення коефіцієнтів поверхневої дифузії. Виконати необхідні розрахунки. Зробити висновки.
8	Атомні механізми масопереносу. <i>Мета роботи</i> – Розв’язання задач з атомної теорії дифузії і визначення основних параметрів (частота стрибків і коливань атомів, ентропія переміщення, коефіцієнт дифузії та енергія утворення вакансій, густина дислокацій і т.і.). Основна література: [2] С. 88 – 94. Завдання на СРС: Опанувати методику розрахунку енергії активації дифузії. Виконати необхідні розрахунки. Зробити висновки.
9	Аномальний масоперенос. Визначення температурних полів та параметрів масопереносу внаслідок імпульсного впливу. <i>Мета роботи</i> – визначення температури нагріву багат шарової тонкоплівкової системи в епіцентрі дії лазерного імпульсу для різних часових інтервалів та розрахунок параметрів лазерно-стимульованого масопереносу. Основна література: [2] С. 24 –28. Модульна контрольна робота – 3 частина. Завдання на СРС: Опанувати теоретичні відомості. Виконати необхідні розрахунки. Зробити висновки.

6. Самостійна робота студента

Вид самостійної роботи студента	Кількість годин	Норма часу на підготовку, год.	Термін часу, год.
Підготовка до лекцій та засвоєння додаткових питань	34	1	34
Підготовка до практичних робіт та опрацювання результатів	18	1,5	27
Підготовка до МКР	2	5	5
Підготовка до екзамену		30	30
		Всього	96

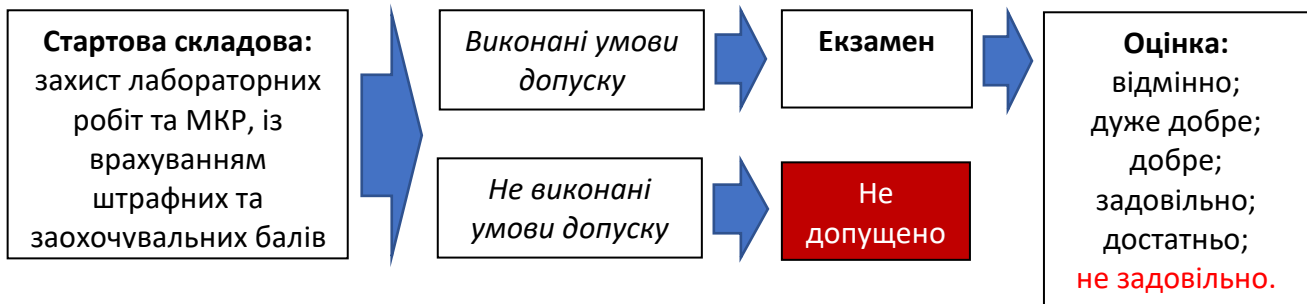
Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

1. Пропущене лекційне заняття необхідно продивитись за допомогою запису ZOOM, законспектувати основні положення, використовуючи матеріали розміщені викладачем в Google Classroom (за посиланням <https://classroom.google.com/c/NjUzODEwMTq3MjE0?cjc=tpakfuc>).
2. Практичні заняття проводяться в комп’ютерному класі кафедри. У разі пропуску практичних занять необхідно попередити викладача і дізнатись про шляхи відпрацювання. Допускається використання власних ноутбуків. У разі дистанційного навчання, студент повинен забезпечити себе персональним комп’ютером з доступом до інтернету.
3. У разі спізнення на пару, студенту необхідно, не заважаючи іншим, зайти в клас, зайняти своє місце. Користуватись мобільним телефоном можна тільки з дозволу викладача. Звук мобільного телефона повинен бути вимкнений. У разі важливих вхідних дзвінків необхідно спитати дозволу викладача, вийти в коридор і провести розмову там.
4. Користуватись мобільними телефонами під час складання екзамену не дозволяється.
5. До екзамену допускаються студенти, які виконали усі практичні завдання та здали модульну контрольну роботу.

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

Оцінювання результатів навчання студентів відбувається за схемою:



Контрольні заходи:

1. Поточний контроль: виконання практичних завдань, МКР.
2. Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.
3. Семестровий контроль: екзамен.

Таблиця видів контролю та максимальної кількості балів за них.

Вид контролю	Кількість	Максимальна кількість балів на 1	Максимальна кількість балів
Виконання практичних завдань	9	4	36
МКР	1	24	24
Екзамен	1	40	40
Всього			100

Оцінювання виконання практичних завдань:

Критерії	Бали
до виконаного завдання немає зауважень, дані правильні відповіді при перевірці	4
є не принципові зауваження до виконаного завдання та/або дані відповіді з помилками при перевірці	3
є принципові зауваження до виконаного завдання та/або не дані відповіді (дані неправильні) при перевірці	робота не здана
несвоєчасний захист роботи	-1

МКР поділена на 3 частини та відбувається у вигляді проходження тестів. Кожна частина МКР складається з 16 питань. За кожну правильну відповідь студент отримує 0,5 бала. Якщо сумарна кількість правильних відповідей менше 10, то ця частина МКР вважається не зданою, при цьому бали не нараховуються. Максимально можлива оцінка за одну частину МКР складає 8 балів. За всі 3 частини – 24 бали.

Умовою допуску до екзамену є виконання всіх практичних робіт, здані 3 частини МКР та сумарний семестровий рейтинг більше 35 балів. Семестровий рейтинг можна підвищити за рахунок заохочувальних балів (максимум на 6) шляхом виконання додаткових індивідуальних завдань (видає викладач). На екзамені слухачу необхідно дати розгорнуті відповіді на 4 питання, кожне з яких оцінюється за наступними критеріями:

Критерії	Бали
правильна відповідь, можливо з несуттєвими зауваженнями, повнота відповіді більша 90%	9-10
є не принципові зауваження, повнота відповіді більша 75%	7-8
є принципові зауваження, але можна вважати що суть питання розкрита, повнота відповіді не менша 60%	6
суть питання не розкрита та/або повнота відповіді менша 60%	0
не перше перескладання	-1

У випадку коли сумарна оцінка за екзамен менше 24 балів, екзамен вважається не зданим, при цьому бали не нараховуються. Для перескладання екзамену є дві додаткові спроби.

Отриманні слухачем рейтингові бали переводять в університетські оцінки за шкалою:

Кількість балів	Оцінка
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)

У освітньому компоненті “Механізми та кінетика масопереносу” денної форми навчання передбачено модульну контрольну роботу. Виконання самостійних завдань (СРС) розподілено рівномірно протягом семестру.

Перелік завдань до СРС видається студентам на початку семестру, чітко повідомляються вимоги до самостійної роботи, строки її виконання, правила оформлення, критерії рейтингового оцінювання.

Всі питання, винесені для самостійного опанування, студенти мають оформлювати у вигляді стислого конспекту. Дата здачі СРС повідомляється на початку семестру.

Всі індивідуальні роботи (СРС, контрольна) вносяться до рейтингової системи оцінювання знань. Запроваджуються штрафні бали за несвоєчасну здачу.

Бали за рейтинговою системою проставляються у Кампусі в розділі Поточний контроль, результати атестації в розділі Атестація. Екзаменаційна відомість створюється і заповнюється в Кампусі, доступ до неї існує упродовж дня екзамену (виправлення і перездача наступного дня не допускаються).

Для покращення сприйняття матеріалу, протягом аудиторних занять демонструється максимальна кількість прикладів практичного прояву явища масопереносу у різноманітних матеріалах, а також результати сучасних експериментальних досліджень у вигляді презентацій.

Для заочної форми навчання протягом лекційних занять передбачається більш детальний опис теоретичного матеріалу, який студенти повинні засвоїти самостійно.

Засоби змішаного навчання. При вивченні даної дисципліни студенти повинні самостійно пройти комп'ютерне тестування для перевірки своїх знань при підготовці до модульної контрольної роботи. При вивченні даної дисципліни використовуються навчальні посібники, друкований і електронний підручник, які розміщені в classroom.google.

Для кращого засвоєння теми «Розв'язки другого рівняння Фіка» потрібно скористатися тренажерною комп'ютерною програмою, яка імітує на основі 10 розв'язків другого рівняння Фіка розвиток процесів масопереносу та дозволяє будувати профілі концентрації за різними вхідними параметрами. Тренажерна програма видається разом з іншими методичними матеріалами в електронному вигляді кожному студенту.

Для студентів заочної форми навчання вся можлива наочна інформація та комплект інших навчально-методичних матеріалів, включно із завданнями для самостійного виконання, надаються в classroom.google в електронному вигляді, можуть надсилатися на адресу електронної пошти групи.

Спілкування з викладачем через Telegram та Viber, електронну пошту.

Перелік запитань до контрольних робіт та семестрового контролю наведено в Додатках.

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: д. ф.-м. н., проф. Волошко С.М.

Ухвалено:

кафедрою Фізичного матеріалознавства та термічної обробки НН ІМЗ ім. Є.О. Патона (протокол № 12 від 22 червня 2023 р.);

кафедрою Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії НН ІМЗ ім. Є.О. Патона (протокол № 16 від 21 червня 2023 р.).

Погоджено:

Методичною комісією НН ІМЗ ім. Є.О. Патона (протокол № 12/23 від 28 червня 2023 р.)

**Перелік запитань для контрольних робіт
з дисципліни «Механізми та кінетика масопереносу»**

Контрольна робота, частина 1 (до Розділу 1. Масоперенос в однорідних середовищах).

1. Завдяки чому відбувається перенос різних властивостей у твердих тілах? Що таке дифузія? Які рушійні сили дифузійного процесу в металах? Чи існує формальна подібність між деякими процесами переносу, наприклад теплопровідністю та дифузією?
2. Роль дифузії у металургійних процесах. Навести конкретні приклади.
3. Феноменологічна та атомна теорії дифузії.
4. Рівняння, які описують тепло- та масоперенос у металах і сплавах. Рівняння Фіка (декартова, циліндрична та сферична системи координат). Коефіцієнти дифузії як скалярні і тензорні величини.
5. Інтегральні та диференціальні форми рівняння балансу речовини. Матеріальні рівняння. Дифузійний та конвективний перенос. Абсорбція.
6. Густина потоку речовини. Перше рівняння Фіка для випадку наявності додаткової рушійної сили. Навести конкретні приклади додаткових рушійних сил.
7. Друге рівняння Фіка. Оператори дивергенції, градієнту, Лапласа.
8. Рівняння масопереносу у найбільш загальному вигляді (абсорбція, хімічна реакція, конвективний перенос). Початкові та крайові умови – Діріхле (I роду), Неймана (II роду) та для випадку поглинання дифузанта, пропорційного концентрації (III роду).
9. Рівняння теплопровідності у загальному вигляді. Постановка початково-крайових задач теплопровідності. Основні поняття теорії теплопровідності - теплообмін, конвекція, теплопередача, тепловіддача, теплоємність, температуропровідність і т.і.
10. Модель “кисневого насосу” при дифузії у тонких плівках. Постановка початково-крайової задачі.
11. Абсорбція і адсорбція. Навести приклади у яких випадках ці процеси чинять вплив на розвиток масопереносу. Граничні умови у дифузійних задачах, що враховують абсорбцію речовини.
12. Опис дифузійного досліду. Перший дифузійний дослід Робертс-Аустіна. Дослідження дифузії радіоактивних ізотопів. Самодифузія та гетеродифузія. Ефект Кіркендалла. Парціальні коефіцієнти дифузії
13. Типи коефіцієнтів дифузії. Рівняння Даркена.
14. Основні типи кристалічних ґраток металів. Анізотропія властивостей кристалів. Коефіцієнт дифузії як тензорна величина.
15. Коефіцієнт дифузії. Анізотропія дифузії. Вплив кристалічної структури, деформації кристалічної ґратки та домішок на швидкість масопереносу. Формула Ареніуса.
16. Коефіцієнт дифузії. Формула Ареніуса. Методика розрахунку енергії активації. Залежність коефіцієнту дифузії від часу та швидкості нагріву.
17. Залежність енергії активації та D_0 від різних факторів (валентності, типу ґратки, температури плавлення, щільності пакування тощо).
18. Самодифузія. Коефіцієнти самодифузії. Експериментальні методи дослідження ізотопного складу.
19. Залежності коефіцієнтів дифузії від різних факторів. Температурна залежність. Формула Ареніуса. Залежність енергії активації домішок від різниці валентностей. Загальні кореляційні залежності. Залежність енергії активації від температури плавлення.
20. Залежність швидкості дифузії від тиску. Бародифузійний ефект.
21. Закономірності дифузії домішок у твердих розчинах втілення та заміщування. Залежність енергії активації від атомного діаметру домішок.
22. Поліморфні перетворення. Фактори, що чинять вплив на дифузійну рухливість атомів у металах з поліморфними перетвореннями.

23. Дифузія в нескінченно розбавлених твердих розчинах. Правило Лазаруса.
24. Дифузія в твердих розчинах втілення. Деформація кристалічної ґратки.
25. Залежність коефіцієнтів дифузії від величини зерна. Монокристалічні, полікристалічні та нанокристалічні матеріали.
26. Залежність коефіцієнтів дифузії від механізму дифузії.
27. Залежність коефіцієнта дифузії від концентрації. Обмежені та необмежені тверді розчини. Метод Матано-Больцмана.
28. Типи найбільш розповсюджених розв'язків другого рівняння Фіка. Їх використання в експериментальній практиці. Стаціонарні задачі.
29. Використання рішення 2-го рівняння у вигляді "функції помилок" для оцінки параметрів дифузії.
30. Використання для розрахунку коефіцієнтів дифузії в необмежених зразках розв'язків другого рівняння Фіка.
31. Використання для розрахунку коефіцієнтів дифузії в напівобмежених зразках розв'язків другого рівняння Фіка.
32. Використання для розрахунку коефіцієнтів дифузії в зразках скінченних розмірів розв'язків другого рівняння Фіка.

Контрольна робота, частина 2 (до Розділу 2. Механізми масопереносу).

1. Зернограничний масоперенос. Основні закономірності. Кристалографічна та дифузійна ширина границь зерен.
2. Математична теорія зернограничної дифузії. Модель ізольованої границі Фішера.
3. Розвиток математичної теорії зернограничного масопереносу. Модель Фішера. Модель Судзуоки для набору ідеальних границь. Модель сферичних зерен. Модель реального полікристалу Левіна-Маккалума.
4. Типи кінетики зернограничного масопереносу. Класифікація Харісона.
5. Масоперенос у тонких металевих плівках.
6. Дифузійно-індукована міграція границь зерен. Дифузійно-індукована рекристалізація зерен.
7. Вплив структури границь зерен на дифузійні процеси.
8. Малокутові границі зерен. Дислокаційна модель. Структура великокутових границь зерен. Модель "аморфного цементу" Білбі-Розенгайна. Островкова модель Мотта.
9. Модель ґратки співпадаючих вузлів Кронберга-Уілсона.
10. Реакційна дифузія. Кінетика взаємної дифузії та росту фаз. Фактори, які впливають на швидкість зростання фаз.
11. Моделі реакційної дифузії: модель молекулярної дифузії Фрі, модель початкової дифузії та наступної реакції, модель початкової реакції та наступної дифузії, острівцева модель Л.Н. Ларікова. Фрактальні структури.
12. Об'ємна, зерногранична та поверхнева дифузія. Порівняти швидкість розвитку процесів масопереносу.
13. Двомірні дефекти кристалічної будови. Поверхня реального кристалу. Енергія утворення адатомів. Поверхнева само- та гетеродифузія.
14. Механізми поверхневої дифузії. Ефект Ребіндера.
15. Застосування методу вторинно-іонної мас-спектрометрії для визначення коефіцієнтів поверхневої дифузії. Метод Фогеля.
16. Метод "поверхневого накопичення". Модель Хванга-Балуфі.
17. Метод "середнього градієнту" Хола-Морабіто. Дані яких спектральних методів можуть бути використані для розрахунку коефіцієнтів дифузії за цим методом? Номограми Хола-Морабіто.

Контрольна робота, частина 3 (до Розділу 3. Спеціальні аспекти масопереносу).

1. Радіометричні та рентгенівські методи дослідження дифузійних процесів.
2. Радіоактивність. Ізотопи та ізобари.
3. Методи розрахунку концентраційної залежності коефіцієнтів дифузії.
4. Метод зняття шарів.
5. Абсорбційний метод.
6. Авторадіографічний метод.

7. Рентгеноструктурний аналіз.
8. Дифракція рентгенівських променів. Формула Вульфа-Брега.
9. Спектральні методи, моделювання концентраційних розподілень.
10. Електронна Оже-спектроскопія (ЕОС).
11. Мас-спектрометрія вторинних іонів (МСВІ).
12. Метод Резерфордівського зворотного розсіяння (РЗР).
13. Явище аномального масоперенесення.
14. Основні методи іки імпульсних навантажень.
15. Ударне механічне навантаження, його характерні параметри – час, тиск, швидкість деформації.
16. Навантаження ударними та пружними хвилями, його характерні параметри – час, тиск, швидкість деформації.
17. Методи вивчення розподілу атомів, засновані на застосуванні радіоактивних ізотопів.
18. Вплив швидкості деформації на аномальне масоперенесення.
19. Вплив температури на аномальне масоперенесення.
20. Вплив типу кристалічної ґратки на аномальне масоперенесення.
21. Атомні механізми аномального масоперенесення.
22. Розрахунок температурних полів та коефіцієнтів дифузії у тонкоплівкових системах після впливу лазерного опромінення.

Питання для проведення екзаменаційної письмової роботи

Питання для проведення екзаменаційної письмової роботи сформовані в білети по 3 запитання з різних розділів.

1. Феноменологічний і мікроскопічний опис масопереносу.
2. Що таке дифузія і її значення.
3. Основні типи теплового руху частинок у газах, рідинах та твердих тілах.
4. Перший науковий дослід з дослідження дифузії у твердому стані.
5. Рівняння теплопровідності Фур'є. Перше рівняння Фіка.
6. Постановка початково-крайових задач тепло- та масопереносу.
7. Початкові, граничні умови та умови спряження на внутрішніх границях розділу.
8. Основні типи розв'язків другого рівняння Фіка. Функція помилок.
9. Дифузія в необмежений зразок з миттєвого джерела.
10. Дифузія в необмежений зразок з шару визначеної товщини.
11. Дифузія в напівобмежений зразок з іншого напівобмеженого зразка.
12. Дифузія в напівобмежений зразок крізь поверхню.
13. Залежність коефіцієнта дифузії від різних факторів
14. Залежність коефіцієнта дифузії від температури. Формула Ареніуса.
15. Залежність коефіцієнта дифузії від атомного радіусу домішок.
16. Залежність коефіцієнта дифузії від різниці валентностей.
17. Залежність коефіцієнта дифузії від концентрації.
18. Загальні кореляційні співвідношення для самодифузії.
19. Вплив дефектів кристалічної ґратки.
20. Радіометричні та рентгенівські методи дослідження дифузійних процесів.
21. Радіоактивність. Ізотопи та ізобари.
22. Методи розрахунку концентраційної залежності коефіцієнтів дифузії.
23. Метод зняття шарів.
24. Абсорбційний метод.
25. Авторадіографічний метод.
26. Рентгеноструктурний аналіз.
27. Дифракція рентгенівських променів. Формула Вульфа-Брега.
28. Спектральні методи, моделювання концентраційних розподілень.
29. Електронна оже-спектроскопія (ЕОС).

30. Мас-спектрометрія вторинних іонів (МСВІ).
31. Метод Резерфордівського зворотного розсіяння (РЗР).
32. Поверхнева дифузія.
33. Поверхнева само- та гетеродифузія.
34. Механізми поверхневої дифузії.
35. Ефект Ребіндера.
36. Масоперенос границями зерен. Модель Фішера.
37. Розвиток математичної теорії зернограничної дифузії.
38. Особливості дифузії у тонких плівках.
39. Дифузійно-індукована міграція границь зерен (DIGM).
40. Загальні закономірності зернограничної дифузії.
41. Типи кінетики зернограничної дифузії. А-тип кінетики. В-тип кінетики. С-тип кінетики.
45. Вплив структури границь зерен на процеси масопереносу.
46. Дислокаційна модель малокутових границь зерен.
47. Структура великокутових границь зерен.
48. Гратка співпадаючих вузлів. Спеціальні границі.
49. Комп'ютерне моделювання границь зерен.
50. Залежність коефіцієнта дифузії та енергії активації від кута розорієнтації зерен.
51. Дифузія в багатофазних системах.
52. Зв'язок між параметрами дифузії та діаграмами фазової рівноваги.
53. Процеси дифузійного росту фаз.
54. Моделі реакційної дифузії.
55. Модель молекулярної дифузії.
56. Модель початкової дифузії і наступної реакції.
57. Модель початкової реакції і наступної дифузії.
58. Острівцева модель Л.Н. Ларікова.
59. Механізми дифузії в металах.
60. Вплив дефектів кристалічної ґратки на дифузію.
61. Рівноважна концентрація вакансій.
62. Джерела і стоки вакансій.
63. Дифузія і випадкові блукання.
64. Ефект Кіркендала.
65. Польовий йонний мікроскоп Мюллера.
66. Атомно-зондова томографія.
67. Потрійні стики границь зерен.
68. Температурна залежність ширини границь зерен.
69. Наноструктурні та нанокристалічні матеріали.
70. Визначення та класифікації нанокристалічних матеріалів. Особливості будови.
71. Розмірний ефект.
72. Особливості дифузії в наноматеріалах.
73. Явище аномального масоперенесення.
74. Основні методики імпульсних навантажень.
75. Ударне механічне навантаження, його характерні параметри – час, тиск, швидкість деформації.
76. Навантаження ударними та пружними хвилями, його характерні параметри – час, тиск, швидкість деформації.
77. Методики вивчення розподілу атомів, засновані на застосуванні радіоактивних ізотопів.
78. Вплив швидкості деформації на аномальне масоперенесення.
79. Вплив температури на аномальне масоперенесення.
80. Вплив типу кристалічної ґратки на аномальне масоперенесення.
81. Атомні механізми аномального масоперенесення.

