

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМ. С. П. ТИМОШЕНКА

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора Інституту механіки
ім. С.П. Тимошенка НАН України
академік НАН України



Володимир НАЗАРЕНКО

Володимир Назаренко 2022 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Механіка руйнування в'язкопружних матеріалів

для здобувачів третього освітньо-наукового рівня вищої освіти
«доктора філософії»

галузь знань	11 Математика та статистика
спеціальність	113 «Прикладна математика»
вид дисципліни	вибіркова

КИЇВ – 2022

Розробники:

Завідувач відділу механіки руйнування матеріалів

д-р фіз.-мат. наук, проф. А. Камінський Анатолій КАМІНСЬКИЙ

Робочу програму узгоджено науково-методичною радою

Протокол від 3 травня 2022р. № 6

Голова науково-методичної ради CV

Робочу програму затверджено Вченою радою Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Протокол від 10 травня 2022 року № 4

Голова Вченої ради В. Назаренко Володимир НАЗАРЕНКО

Робочу програму узгоджено з гарантом освітньо-наукової програми (керівником програми) 113 «Прикладна математика» 3 травня 2022р.

Гарант освітньо-наукової програми В. Назаренко Володимир НАЗАРЕНКО

Пролонговано Вченою радою Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка:

Навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради Імех НАНУ	Підпис	№ протоколу	Дата протоколу
20__/20__				
20__/20__				
20__/20__				
20__/20__				

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Найменування показників	Характеристика дисципліни
Вид дисципліни	вибіркова
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Загальний обсяг кредитів / годин	4/120
Курс	2
Семестр	3
Кількість змістових модулів з розподілом	2
Кількість кредитів	4
Обсяг академічних годин, в тому числі	120
Лекції	20
Практичні заняття	20
Самостійна робота	80
Форма підсумкового контролю	залік

2. МЕТА, ЗАВДАННЯ ТА ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Робоча програма навчальної дисципліни «**Механіка руйнування**» є нормативним документом, який розроблено на основі освітньо-наукової програми, далі ОНП, (затверджена Вченою радою Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України., протокол № 5 від 26 грудня 2017 року) підготовки здобувачів третього освітньо-наукового рівня вищої освіти відповідно до навчального плану спеціальності 113 «Прикладна математика».

Навчальна дисципліна «Механіка руйнування» є складовою циклу професійної підготовки фахівців третього освітньо-наукового рівня “доктор філософії”

Передумова вивчення. Програма курсу орієнтована на аспірантів, які вже знайомі з дисциплінами професійної та практичної підготовки фахівців-механіків, зокрема з курсом механіки суцільних середовищ, загальним курсом теорії диференціальних рівнянь, математичної фізики та обов’язкових курсів освітньо-наукової програми ДВІ 1 та ДВІ 2, які вивчаються на першому курсі аспірантури. Вони повинні володіти методами обчислювальної математики та методами математичного моделювання систем та процесів.

Метою навчальної дисципліни «Механіка руйнування» є набуття знань та вмінь розв’язання комплексних проблем в галузі механіки деформованого твердого тіла шляхом здобуття ними компетентностей, необхідних для виконання *самостійних та оригінальних наукових досліджень*, результати яких мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

Головними завданнями вивчення навчальної дисципліни «Механіка руйнування» є формування знань, практичних навичок та компетентностей, потрібних для проведення самостійних кваліфікованих наукових досліджень:

- Загальні компетентності: ЗК1 – ЗК6 (відповідно до переліку загальних компетентностей ОНП).
- Спеціальні (фахові) компетентності: СК1 – СК7 (відповідно до переліку спеціальних компетентностей ОНП).
- Загальні програмні результати навчання: ПРН1 – ПРН6, ПРН11 (відповідно до переліку програмних результатів навчання ОНП).

Програмні результати навчання за дисципліною (вимоги до знань та вмінь):

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен *знати:*

- основні концепції, наукові школи та праці провідних вітчизняних і зарубіжних науковців у сфері механіки руйнування;
- рівняння, які описують поведінку тіл в околі вершини тріщини;
- постановки задач механіки руйнування;
- аналітичні і числові методи, прикладні програмні комплекси, які застосовуються для дослідження поведінки елементів конструкцій з тріщинами;

вміти:

- розробляти математичні моделі конструкцій з тріщинами;
- розв'язувати базові задачі механіки руйнування методом комплексних потенціалів;
- розв'язувати задачі механіки руйнування методом скінченних елементів.

3. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Змістовний модуль 1. Основи механіки руйнування

Тема 1. Вступ до дисципліни.

Руйнування твердих тіл. Принципи механіки руйнування. Історія механіки руйнування (теорія руйнування Гріффітса, механіка руйнування як інженерна наука, останні розробки в дослідженні механіки руйнування).

Тема 2. Теорія руйнування Гріффітса та концепція поверхневої енергії.

Теоретична міцність (атомістична модель, введення в розгляд енергії). Теорія руйнування Гріффітса. Співвідношення між енергіями.

Тема 3. Поле напружень в околі вершини тріщини.

Поля пружних напружень та переміщень поблизу вершини тріщини, концепція коефіцієнта інтенсивності напружень Ірвіна. Детальні виведення полів напруження та коефіцієнта інтенсивності напруження K з використанням методу комплексного потенціалу та підходу асимптотичного розвинення Вільямса. Критерій руйнування, заснований на коефіцієнті інтенсивності напруження (K -критерій), концепція K -домінування (обмеження K -критерію).

Тема 4. Швидкість вивільнення енергії в поєднанні з J -інтегралом, незалежним від шляху.

Концепція швидкості вивільнення енергії. Встановлення залежності між швидкістю вивільнення енергії G і коефіцієнтом інтенсивності напруження (відношення $G-K$) методом закриття тріщини. Критерій руйнування, заснований на швидкості вивільнення енергії (критерій G). J -інтеграл як швидкість вивільнення енергії, незалежність його від шляху. Співвідношення між J і K .

Декілька числових методів на основі скінченних елементів для розрахунку швидкості вивільнення енергії та коефіцієнта інтенсивності напруження з використанням методу закриття тріщин. Вплив тривимірного ефекту на зміну інтенсивності напруження вздовж фронту тріщини.

Тема 5. Змішаний режим руйнування.

Проста еліптична модель руйнування. Критерій максимального напруження на розтяг. Критерій щільності енергії деформації. Критерій максимальної швидкості вивільнення енергії. Експериментальна перевірка.

Змістовний модуль 2. Моделі та критерії механіки руйнування

Тема 6. Пластичність.

Пластичні зони біля вершини тріщини для трьох типів руйнування. Критерії Тріска та Мізеса. Конститутивні співвідношення в пластичності (теорія течії, деформаційна теорія). Модель пластичності Ірвіна для тріщини нормального відриву (розмір зони пластичності, ефективна довжина тріщини та скоригований коефіцієнт інтенсивності напруження, розкриття в вершині тріщини). Модель Дагдейла (концепція тонкої структури (small-scale yielding), тріщина в нескінченній пластині). Оцінка форми зони пластичності за допомогою пружного розв'язку (головні напруження, випадок плоского напруженого стану та плоскої деформації, антиплоска деформація).

Отримання форми зони пластичності за допомогою методу скінченних елементів). Розв'язок для тріщини поздовжнього зсуву в рамках концепції тон-

кої структури (основні рівняння, пружно-пластичний розв'язок та пластична зона в вершині тріщини). Розв'язок для тріщини поздовжнього зсуву в рамках концепції тонкої структури – пружний матеріал з показниковим зміцненням (основні рівняння, граничні умови для концепції тонкої структури, пружно-пластичний розв'язок). HRR поле. Концепція швидкості вивільнення енергії в пружно-пластичних матеріалах.

Тема 7. Пружно-пластичний критерій руйнування.

Підхід скоригованого коефіцієнта інтенсивності напружень Ірвіна. Підхід кривої K опору. J-інтеграл як параметр руйнування. Критерій розкриття в вершині тріщини. Критерій кута розкриття в вершині тріщини.

Тема 8. Тріщини на межі розділу двох різних тіл.

Поля біля вершини тріщини (асимптотичні поля напружень і переміщень, випадок тріщини поздовжнього зсуву, параметри Дандерса). Застосування методу комплексних потенціалів та коефіцієнта інтенсивності напружень (коефіцієнт інтенсивності напружень для двох базових задач, коментарі до визначення коефіцієнта інтенсивності напружень). Контактна зона на поверхні тріщини та зона осциляції напружень. Швидкість вивільнення енергії (обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень). Критерій руйнування. Відхилення тріщини від межі розділу двох тіл. Контакт та тертя в тріщинах на межі розділу тіл (поля в вершині тріщини, використання процедури методу скінченних елементів для обчислення енергії, критерій руйнування)

Тема 9. Модель когезійної зони.

Модель Баренблата. Концепція когезійної зони в механіці суцільного середовища та когезійний закон (модель Дагдейла, модель лінійного розміщення, трапецоїдальна модель, експоненціальна модель). Когезійна модель та ЛПМР. Когезійна модель для міжфазної тріщини (когезійний закон для змішаного режиму руйнування, щільність когезійної енергії, когезійна довжина).

Тема 10. Механіка руйнування анізотропних тіл та неоднорідних матеріалів. Динамічна механіка руйнування. Повільне поширення тріщин.

Основні рівняння плоскої теорії пружності для анізотропних тіл. Тріщина нормального відриву в нескінченній пластині за рівномірного тиску на поверхні тріщини. Тріщина поперечного зсуву за рівномірних зсувних сил на поверхні тріщини. Швидкість вивільнення енергії для тріщини в анізотропному тілі. Основні рівняння плоскої теорії пружності для неоднорідних матеріалів.

Напруження та переміщення в вершині тріщини в неоднорідному матеріалі. Швидкість вивільнення енергії для тріщини в неоднорідному матеріалі. Основні рівняння плоскої еластодинаміки. Стаціонарна тріщина за динамічного навантаження. Динамічне розповсюдження тріщини. Тріщина Йофе. Методи розв'язання граничних задач лінійної теорії в'язкопружності для тіл з рухомими тріщинами.

Механіко-математичні моделі руйнування в'язкопружних тіл з тріщинами. Енергетичні і деформаційні критерії руйнування в'язкопружних тіл. Кінетика розвитку тріщин в ізотропних та анізотропних в'язкопружних тілах. Методи розв'язання задач про довговічність композиційних матеріалів з тріщинами. Докритичний розвиток тріщин в старіючих в'язкопружних тілах. Механіко-математичні моделі тріщин в томи у в'язкопружних матеріалах.

4. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (РОЗПОДІЛ ГОДИН)

№	Назва теми	Кількість годин		
		Лекції	Практичні заняття	Самост. робота
<i>Змістовний модуль 1. Основи механіки руйнування</i>				
1	Вступ до дисципліни	2	2	8
2	Теорія руйнування Гріффітса та концепція поверхневої енергії	2	2	8
3	Поле напружень в околі вершини тріщини	2	2	8
4	Швидкість вивільнення енергії в поєднанні з J-інтегралом, незалежним від шляху	2	2	8
5	Змішаний режим руйнування	2	2	8
<i>Змістовний модуль 2. Моделі та критерії механіки руйнування</i>				
6	Пластичність	2	2	8
7	Пружно-пластичний критерій руйнування	2	2	8
8	Тріщини на межі розділу двох різних тіл	2	2	8
9	Модель когезійної зони	2	2	8
10	Механіка руйнування анізотропних тіл та неоднорідних матеріалів. Динамічна механіка руйнування. Повільне поширення тріщин	2	2	8
Всього годин за семестр		20	20	80

5. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Змістовний модуль 1. Основи механіки руйнування

Тема 1. Вступ до дисципліни

Лекція 1. Явище руйнування в природі та інженерії. Дисципліна «Механіка руйнування». Обчислювальні методи для тріщини. Огляд основної літератури з механіки руйнування та обчислювальних пакетів. Макроскопічні та мікроскопічні прояви руйнування. Класифікація процесів руйнування. Припущення моделей.

Практичне заняття 1.1. Метод комплексних потенціалів. Двовимірні задачі механіки руйнування (тріщина нормального відриву, тріщина поперечного зсуву, тріщина повздовжнього зсуву). Тривимірні задачі механіки руйнування (внутрішня еліптична тріщина при розтязі, просторове поле в околі вершини тріщини).

Практичне заняття 1.2. Основи методу скінченних елементів. Енергетичні принципи механіки суцільного середовища (варіація поля переміщення та сил, змішані та гібридні варіаційні принципи, принцип Гамільтона). Основні рівняння методу скінчених елементів (матриця жорсткості елемента, отримання глобальної матриці жорсткості). Числова реалізація методу скінченних елементів (вибір функцій форми, трикутний, чотирикутний, тетраедричний та шестигранний ізопараметричні елементи, числове інтегрування характеристик поля).

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу який винесено на самостійне вивчення:
 - Історія виникнення та розвитку механіки руйнування.
 - Основні концепції та моделі механіки руйнування.

Література: основна – 1, 7, 10, 11; додаткова – 13, 17.

Тема 2. Теорія руйнування Гріффітса та концепція поверхневої енергії

Лекція 2. Теоретична міцність (атомістична модель, введення в розгляд енергії). Теорія руйнування Гріффітса. Співвідношення між енергіями.

Практичне заняття 2.1. Методи скінченних елементів для аналізу тріщин у лінійно-пружних конструкціях (інтерпретація числових розв'язків в околі вершини тріщини).

Практичне заняття 2.2. Спеціальні скінченні елементи вершини тріщини (розробка елементів вершини, модифікований елемент перемішень).

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
 - Енергетичний критерій поширення тріщини для фіксованої сили і умови жорсткого закріплення (випадок м'якої та твердої пружин, загальний випадок).
 - Експериментальне визначення поверхневої енергії.

Література: основна – 2, 6, 4, 10; додаткова – 15, 17.

Тема 3. Поле напружень в околі вершини тріщини

Лекція 3. Поля пружних напружень та переміщень поблизу вершини тріщини, концепція коефіцієнта інтенсивності напружень Ірвіна. Детальні виведення полів напруження та коефіцієнта інтенсивності напруження K з використанням методу комплексного потенціалу та підходу асимптотичного розвинення Вільямса. Критерій руйнування, заснований на коефіцієнті інтенсивності напруження (K -критерій), концепція K -домінування (обмеження K -критерію).

Практичне заняття 3.1. Коефіцієнт інтенсивності напружень. K -концепція. Енергетичний баланс при поширенні тріщини (глобальна та локальна швидкості вивільнення енергії, інтеграл змикання берегів тріщини, стійкість поширення тріщини). Тріщина в анізотропному пружному тілі. Вагова функція механіки руйнування.

Практичне заняття 3.2. Обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень використовуючи спеціальні елементи вершини тріщини. Розробка гібридних скінченних елементів вершини тріщини.

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Плоскі та антиплоскі задачі. Плоский напружений стан та плоска деформація. Рівняння сумісності деформацій. Функція напружень Ері.
 - Деякі класичні двовимірні задачі теорії пружності (задачі про пластини та балку, задачі на півплощині, задачі з круглими отворами, дисками та циліндричними резервуарами під тиском).

Література: основна – 2, 6, 10, 11; додаткова – 13, 15.

Тема 4. Швидкість вивільнення енергії в поєднанні з J -інтегралом, незалежним від шляху

Лекція 4. Концепція швидкості вивільнення енергії. Встановлення залежності між швидкістю вивільнення енергії G і коефіцієнтом інтенсивності напруження (відношення $G - K$) методом закриття тріщини. Критерій руйнування, заснований на швидкості вивільнення енергії (критерій G). J -інтеграл як швидкість вивільнення енергії, незалежність його від шляху. Співвідношення між J і K .

Декілька числових методів на основі скінченних елементів для розрахунку швидкості вивільнення енергії та коефіцієнта інтенсивності напруження з використанням методу закриття тріщин. Вплив тривимірного ефекту на зміну інтенсивності напруження вздовж фронту тріщини.

Практичне заняття 4.1. Обчислення J -інтеграла та коефіцієнта інтенсивності напружень тріщини нормального відриву та тріщини змішаного режиму руйнування методом скінчених елементів.

Практичне заняття 4.2. Метод глобальної швидкості вивільнення енергії (реалізація в рамках скінченно-елементного аналізу, метод віртуального подовження тріщин, метод інтеграла замикання тріщин).

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Обчислення J -інтеграла та коефіцієнта інтенсивності напружень в прикладних пакетах ANSYS та COMSOL.
 - Скінченно-елементний розрахунок вагової функції механіки руйнування (визначення зосередженими силами, визначення параметричної функції впливу, отримання з поля переміщень, застосування J -VCE процедури, розрахунок за допомогою сингулярності Бюкнера).

Література основна – 6, 7, 8; додаткова – 14.

Тема 5. Змішаний режим руйнування. Числове моделювання зростання тріщини.

Лекція 5. Проста еліптична модель руйнування. Критерій максимального напруження на розтяг. Критерій щільності енергії деформації. Критерій максимальної швидкості вивільнення енергії. Експериментальна перевірка.

Практичне заняття 5.1. Визначення напрямку поширення тріщини.

Практичне заняття 5.2. Моделювання зростання тріщини (техніка вивільнення вузла, техніка модифікації елемента, техніка видалення елемента, модифікація жорсткості елемента, адаптивні стратегії перерозбивки (адаптивна сітка з контролем помилок, моделювання поширення тріщин)).

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Адаптований до задач механіки руйнування розширений метод скінченних елементів (XFEM).

Література: основна – 3, 4, 6, 7, 9, 11; додаткова – 12,15.

Змістовний модуль 2. Моделі та критерії механіки руйнування

Тема 6. Пластичність

Лекція 6.1. Пластичні зони біля вершини тріщини для трьох типів руйнування. Критерії Тріска та Мізеса. Конститутивні співвідношення в пластичності (теорія течії, деформаційна теорія). Модель пластичності Ірвіна для тріщини нормального відриву (розмір зони пластичності, ефективна довжина тріщини та скоригований коефіцієнт інтенсивності напруження, розкриття в вершині тріщини). Модель Дагдейла (концепція тонкої структури (small-scale yielding), тріщина в нескінченній пластині). Оцінка форми зони пластичності за допомогою пружного розв'язку (головні напруження, випадок плоского напруженого стану та плоскої деформації, антиплоска деформація).

Лекція 6.2. Отримання форми зони пластичності за допомогою методу скінченних елементів). Розв'язок для тріщини поздовжнього зсуву в рамках концепції тонкої структури (основні рівняння, пружно-пластичний розв'язок та пластична зона в вершині тріщини). Розв'язок для тріщини поздовжнього зсуву в рамках концепції тонкої структури – пружний матеріал з показниковим зміцненням (основні рівняння, граничні умови для концепції тонкої структури, пружно-пластичний розв'язок). HRR поле. Концепція швидкості вивільнення енергії в пружно-пластичних матеріалах.

Практичне заняття 6.1. Скінченно-елементний алгоритм аналізу тріщин в пружно-пластичних конструкціях (пружно-пластичні елементи вершини тріщини, пружно-пластичне узагальнення J-інтеграла).

Практичне заняття 6.2. Застосування скінченно-елементного алгоритму аналізу тріщин в пружно-пластичних конструкціях для стаціонарних та зростаючих тріщин.

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Інженерний підхід пружно-пластичної механіки руйнування.

Література: основна – 1, 5, 7, 8, 10, 11; додаткова – 12–14, 16.

Тема 7. Пружно-пластичний критерій руйнування

Лекція 7. Підхід скоригованого коефіцієнта інтенсивності напружень Ірвіна. Підхід кривої К опору. J-інтеграл як параметр руйнування. Критерій розкриття в вершині тріщини. Критерій кута розкриття в вершині тріщини.

Практичне заняття 7.1. Пружно-пластичний аналіз компактного зразку на розтяг скінченно-елементним підходом.

Практичне заняття 7.2. Пружно-пластичний аналіз пластини з поверхневою тріщиною скінченно-елементним підходом.

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Експериментальне визначення критичного значення J-інтегралу.

Література: основна – 2, 3, 4, 6, 9, 10; додаткова – 13–18.

Тема 8. Тріщини на межі розділу двох різних тіл.

Лекція 8.1. Поля біля вершини тріщини (асимптотичні поля напружень і переміщень, випадок тріщини поздовжнього зсуву, параметри Дандерса). Застосування методу комплексних потенціалів та коефіцієнта інтенсивності напружень (коефіцієнт інтенсивності напружень для двох базових задач, коментарі до визначення коефіцієнта інтенсивності напружень).

Лекція 8.2. Контактна зона на поверхні тріщини та зона осциляції напружень. Швидкість вивільнення енергії (обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень). Критерій руйнування. Відхилення тріщини від межі розділу двох тіл. Контакт та тертя в тріщинах на межі розділу тіл (поля в вершині тріщини, використання процедури методу скінченних елементів для обчислення енергії, критерій руйнування)

Практичне заняття 8. Визначення коефіцієнту інтенсивності напружень міжфазної тріщини.

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Тріщина на межі поділу двох анізотропних середовищ.

Література: основна – 2, 3, 4, 6, 9, 10; додаткова – 13–18.

Тема 9. Модель когезійної зони

Лекція 9. Фізичне підґрунтя моделі. Модель Баренблата. Концепція когезійної зони м механіці суцільного середовища та когезійний закон (модель Дагдейла, модель лінійного розміщення, трапецоїдальна модель, експоненціальна модель). Когезійна модель та ЛПМР. Когезійна модель для міжфазної тріщини (когезійний закон для змішаного режиму руйнування, щільність когезійної енергії, когезійна довжина).

Практичне заняття 9.1. Числова реалізація моделі когезійної зони.

Практичне заняття 9.2. Приклади дослідження поширення тріщин втоми.

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Закони зчеплення–відриву для аналізу тріщин змішаного режиму руйнування.
 - Імплементация законів зчеплення–відриву в процедуру методу скінченних елементів.

Література: основна – 6, 8, 11; додаткова – 12, 14, 16.

Тема 10. Механіка руйнування анізотропних тіл та неоднорідних матеріалів. Динамічна механіка руйнування. Повільне поширення тріщин

Лекція 10.1. Основні рівняння плоскої теорії пружності для анізотропних тіл. Тріщина нормального відриву в нескінченній пластині за рівномірного тиску на поверхні тріщини. Тріщина поперечного зсуву за рівномірних зсувних сил на поверхні тріщини. Швидкість вивільнення енергії для тріщини в анізотропному тілі. Основні рівняння плоскої теорії пружності для неоднорідних матеріалів. Напруження та переміщення в вершині тріщини в неоднорідному матеріалі. Швидкість вивільнення енергії для тріщини в неоднорідному матеріалі. Основні рівняння плоскої еластодинаміки. Стаціонарна тріщина за динамічного навантаження. Динамічне розповсюдження тріщини. Тріщина Йоффе. Методи розв'язання граничних задач лінійної теорії в'язкопружності для тіл з рухомими тріщинами. Тріщина у функціонально градуйованому матеріалі.

Лекція 10.2. Відтерміноване руйнування. Механіко-математичні моделі руйнування в'язкопружних тіл з тріщинами. Енергетичні і деформаційні критерії

руйнування в'язкопружних тіл. Кінетика розвитку тріщин в ізотропних та анізотропних в'язкопружних тілах. Методи розв'язання задач про довговічність композиційних матеріалів з тріщинами. Докритичний розвиток тріщин в старіючих в'язкопружних тілах. Механіко-математичні моделі тріщин в тому у в'язкопружних матеріалах.

Практичне заняття 10.1. Динамічні процеси механіки руйнування (рівняння руху вершини тріщини, модель динамічного розповсюдження тріщини, динамічне поширення тріщин у пружно-пластичних матеріалах).

Практичне заняття 10.2. Визначення кінетики повільного зростання тріщини в ізотропному та ортотропному тілі вздовж наперед відомого шляху.

Завдання для самостійної роботи

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:
 - Фізичні та інженерні аспекти руйнування (процеси в околі вершини тріщини, прогноз зародження тріщини, статистична теорія міцності матеріалів Вейбула).

Література: основна – 6, 10, 11; додаткова – 17.

Самостійна робота аспіранта, її зміст та обсяг

№ з/п	Зміст самостійної роботи аспіранта	Обсяг СР (годин)
1	Опрацювання лекційного матеріалу	20
2	Підготовка до практичних занять	20
3	Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення	40
	Всього	80

6. СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТНЬО-НАУКОВОГО СТУПЕНЯ

6.1 Політика дотримання академічної доброчесності

Очікується, що аспіранти знайомі з основними принципами академічної доброчесності, самостійно виконують усі навчальні завдання, коректно посилаються на використані джерела інформації при написанні власного наукового або навчального дослідження, тощо. Неприпустимим є списування

при написанні контрольних робіт та складанні заліку (у тому числі з використанням мобільних пристроїв). У разі виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі аспіранта вона не зараховується викладачем.

6.2 Політика щодо відвідування занять

Відвідування занять є обов'язковим компонентом навчального процесу. За об'єктивних причин (наприклад, міжнародне стажування, епідеміологічні обмеження тощо) навчання може відбуватись в он-лайн формі за погодженням із керівником курсу та керівником аспірантури.

6.4 Система рейтингових балів

Рейтинг аспіранта з даної дисципліни складається з балів, що він отримує за:

1. Експрес-контроль – 20 балів.
2. Активну роботу на практичних заняттях - 20 балів.
3. Модульні контрольні роботи -20 балів (2x10=20)
3. Залік - 40 балів.

Заохочується представлення доповіді на наукових конференціях, семінарах, подання статті в журнал *за тематикою курсу* і додатково оцінюється у 10 балів.

Експрес-контроль проводиться з метою перевірки якості роботи аспіранта в аудиторії і самостійної роботи в позааудиторний час шляхом усного опитування чи самостійних письмових робіт тривалістю 10 – 30 хвилин, або індивідуальних домашніх завдань протягом семестру. Проводиться декілька раз (2 - 4) з максимальною сумарною оцінкою у 20 балів.

Залік складається аспірантом в аудиторний час і на нього виносяться питання та завдання, кожне з яких оцінюється за бальною системою.

6.5 Розрахункова шкала рейтингу

Максимальна сумарна кількість балів протягом семестру складає:
 $20+20+20+40=100$ (балів).

Рейтинг RD аспіранта складається з рейтингу, одержаного протягом семестру з урахуванням додаткових балів. Аспіранти, які набрали протягом семестру менше 30 балів, зобов'язані підвищити свій рейтинг, інакше вони не допускаються до заліку з цієї дисципліни і мають академічну заборгованість. Для підвищення рейтингу вони отримують можливість написати додаткову контрольну роботу та виконати індивідуальні домашні завдання.

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі	Оцінка	Оцінка за національною шкалою
-------------------	--------	-------------------------------

види навчальної діяльності	ECTS	для екзамену	для заліку
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

«Відмінно» A (90-100 балів) – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з можливими незначними недоліками

«Добре» - B (82-89 балів) – дуже добре – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.

«Добре» - C (74-81 балів) – в цілому добрий рівень знань (умінь) з незначною кількістю помилок.

«Задовільно» - D (64-73 балів) – виставляється аспіранту, який має знання тільки основного матеріалу, але не засвоїв його деталей, допускає неточності, неправильне тлумачення окремих елементів завдання та відчуває труднощі при виконанні практичних завдань.

«Задовільно» - E (60-63 балів) – достатньо – мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь).

«Незадовільно» - FX (35-59 балів) - виставляється аспіранту, який дає необґрунтовані відповіді на запитання, допускає суттєві помилки у використанні понятійного апарату. Не простежується логічність та послідовність думки. Формулювання хаотичні та не усвідомлені.

«Незадовільно» - F (1-34 балів) - виставляється аспіранту, який не засвоїв зміст дисципліни, вміння та навички не набуті.

7. ОРІЄНТОВНИЙ ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДО ЗАЛІКУ

1. Місце і роль механіки руйнування для фундаментальних проблем природознавства.
2. Математичні методи визначення напружено-деформованого стану тіла з тріщиною.
3. Поля напружень та переміщень в околі вершини тріщин.
4. Фундаментальні розв'язки для коефіцієнта інтенсивності напружень.
5. Швидкість вивільнення пружної енергії; співвідношення між швидкістю вивільнення пружної енергії та коефіцієнтами інтенсивності напружень.
6. Енергетичні та силові критерії лінійної механіки руйнування.
7. Змішаний режим руйнування; критерії змішаного режиму руйнування.
8. Пластичність в вершині тріщини; моделі Ірвіна та Дагдейла; оцінка форми та розмірів зони пластичності; концепція маломасштабної текучості (концепція тонкої структури).
9. Тріщина на межі поділу двох середовищ.
10. Механіко-математичні моделі тріщини з зонами зчеплення в рамках нелінійної механіки руйнування; концепція квазікрихкого руйнування.
11. Енергетичні та деформаційні критерії нелінійної механіки руйнування.
12. Методи розв'язання граничних задач лінійної теорії в'язкопружності для тіл з рухомими тріщинами.
13. Механіко-математичні моделі руйнування в'язкопружних тіл з тріщинами.
14. Енергетичні і деформаційні критерії руйнування в'язкопружних тіл.
15. Кінетика розвитку тріщин в ізотропних та анізотропних в'язкопружних тілах.
16. Методи розв'язання задач про довговічність композиційних матеріалів з тріщинами.
17. Докритичний розвиток тріщин в старіючих в'язкопружних тілах.
18. Механіко-математичні моделі тріщин в томи у в'язкопружних матеріалах.

8. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

8.1. Основні рекомендовані джерела

1. Anderson, T.L.: Fracture mechanics fundamentals and applications. Taylor & Francis Group, Boca Raton (2017)
2. Broberg, K.B.: Cracks and fracture. Academic Press, London (1999)
3. Broek, D.: The practical use of fracture mechanics. Kluwer, Dordrecht (1988)
4. Gdoutos, E.E.: Fracture mechanics criteria and applications. Kluwer, Dordrecht (1990)
5. Gdoutos, E.E.: Fracture mechanics: An introduction. Kluwer, Dordrecht (1993)

6. Gross, D., Seelig, T.: Fracture mechanics with an introduction to micromechanics. Springer, Heidelberg (2011)
7. Kuna, M.: Finite elements in fracture mechanics: theory–numerics–applications. Springer, Freiberg (2013)
8. Perez, N.: Fracture mechanics. Springer International Publishing Switzerland (2017)
9. Recho, N.: Fracture mechanics and crack growth. ISTE Ltd, London (2012)
10. Slepian, L.I.: Models and phenomena in fracture mechanics. Springer, Heidelberg (2002)
11. Sun, C.T., Jin, Z.-H.: Fracture mechanics. Elsevier, Waltham (2012)

8.2. Додаткові рекомендовані джерела

12. Kanninen, M.F., Popelar, C.H.: Advanced Fracture Mechanics. Oxford University Press, New York (1985)
13. Kundu, T.: Fundamentals of fracture mechanics. Taylor & Francis Group, Boca Raton (2008)
14. Saxena, A.: Nonlinear fracture mechanics for engineers. CRC Press LLC, Boca Raton (1998)
15. Unger, D.J.: Analytical fracture mechanics. Academic Press, San Diego (1995)
16. Черепанов, Г.П.: Механика разрушения композиционных материалов. Нака, Москва (1983)
17. Черепанов, Г.П.: Механика хрупкого разрушения. Наука, Москва (1974)