Національна академія наук України

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заступник директора

_____

“____” _____ 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Математичне моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у сучасних конструкціях

(назва навчальної дисципліни)

підготовки докторів філософії

зі спеціальності 113 Прикладна математика

2024 / 2025 навчальний рік

Робочу програму навчальної дисципліни «Математичне моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у сучасних конструкціях» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур» підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Розробники: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)
Чернобривко Марина Вікторівна, д-р техн. наук, с.н.с., провідний науковий співробітник відділу нелінійної механіки та математичного моделювання

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою інституту 23 квітня 2025 року, протокол № 4.

Програму схвалено на розширеному засіданні відділу нелінійної механіки та математичного моделювання.

Протокол № 1 від 21.04.2025 р.

Завідувач відділу

_____ Аврамов К. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-технічною проблемною радою «Математичне моделювання. Механіка деформованого твердого тіла. Динаміка і міцність машин. Магнетизм технічних об'єктів».

Протокол № 7 від 22.04.2025 р.

Заступник голови НТПР _____

_____ Максименко-Шейко К. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

1. Опис навчальної дисципліни

Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни є оволодіння методами чисельного розв'язання фізично-нелінійних задач механіки деформівного твердого тіла, формування практичних умінь і навичок щодо постановки задач моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у сучасних конструкціях, розробки математично-комп'ютерного інструментарію для їх розв'язання та його використання при розв'язанні практичних задач.

Перелік компетентностей та програмних результатів навчання, що забезпечує дисципліна

Компетентності

ЗК8 Здатність виявляти, ставити і вирішувати проблеми.

ЗК10 Знання і розуміння предметної області та розуміння професії.

ЗК11 Здатність до абстрактного та аналітичного мислення й генерування ідей.

ФК1 Здатність виявляти актуальні прикладні математичні проблеми і застосовувати поглиблені знання з прикладної математики.

ФК2 Здатність розробляти математичні моделі, що адекватно описують геометрію досліджуваних об'єктів і систем та фізичні явища, що відбуваються в них.

ФК3 Здатність застосовувати сучасні методи математичного моделювання і оптимізації для розв'язання задач прикладної математики.

ФК6 Здатність використовувати сучасні програмні засоби для розв'язання задач прикладної математики.

ФК7 Здатність проводити обчислювальні експерименти з обробкою розрахункових даних і їх аналізом.

ФК8 Здатність аналізувати та інтерпретувати результати розв'язання задач прикладної математики.

Програмні результати навчання

ПРН1 Знати та критично оцінювати теорії, положення та концептуальні підходи до вирішення комплексних наукових і практичних завдань в галузі прикладної математики.

ПРН3 Знати і розуміти принципи побудови математичних моделей фізичних явищ і процесів.

ПРН4 Знати сучасні методи моделювання і оптимального геометричного проектування і уміти вдосконалювати їх.

ПРН7 Вміти проводити розрахункові дослідження та аналізувати отримані чисельні результати.

Характеристика навчальної дисципліни

Вибіркова освітня компонента	
Кількість кредитів	3
Рік підготовки	2-й
Семестр	2-й
Загальна кількість годин	90
Лекції	24 год.
Практичні заняття	6 год.
Індивідуальні заняття	__ год.
Самостійна робота	60 год.
Вид підсумкового контролю	залік

2. Зв'язок з іншими освітніми компонентами

Освітні компоненти, що передують вивченню:
ОК2 Іноземна мова професійного спрямування
ОК5 Сучасні методи обчислювальної математики
ОК7 Моделі та методи нелінійної динаміки
Освітні компоненти, які розвивають результати навчання за цією дисципліною:
немає

3. Заплановані результати навчання

Після вивчення курсу аспіранти повинні:

Знати: важливі поняття теорії фізично-нелінійних задач механіки деформівного твердого тіла; основні математичні методи дослідження динамічного напружено-деформованого та граничного стану елементів конструкцій при механічних навантаженнях; методи чисельного розв'язання задач швидкісного та пластичного деформування елементів конструкцій.

Вміти: формулювати задачу, формувати математичну модель фізичних процесів, що розглядаються, будувати алгоритми розрахунку для розв'язання різних типів, проводити розрахунки та аналізувати отримані результати, використовувати отримані знання для розв'язання прикладних задач за спеціальністю.

Розуміти: властивості та можливості методів і алгоритмів моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у сучасних конструкціях.

4. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у конструкціях з полікристалічних матеріалів

Тема 1. Особливості пластичного плину полікристалічних матеріалів в умовах швидкісного деформування.

Огляд результатів експериментальних досліджень напружено-деформованого стану в полікристалічних матеріалах внаслідок швидкісного навантаження. Особливості пластичного плину матеріалу в умовах швидкісного деформування.

Тема 2. Математичні моделі швидкісного деформування конструкцій

Начальні зауваження. Рівняння руху. Визначення повної деформації. Співвідношення між напруженнями та деформаціями. Моделі пластичного плину полікристалічних матеріалів. Урахування впливу температури.

Тема 3. Основні критерії руйнування матеріалу в елементах конструкцій

Рівняння стану. Границі текучості та міцності, що враховують динамічні властивості матеріалу конструкції та температурний режим процесу деформування.

Тема 4. Основні чисельні методи розв'язання початково-крайових задач для випадку швидкісного навантаження

Застосування методів скінченних елементів та кінцевих різниць для початково-крайових задач швидкісного навантаження конструкцій довільної геометричної форми та тонких корпусних конструкцій.

Розділ 2. Моделювання процесів швидкісного деформування у конструкціях з композитних та нанокомпозитних матеріалів

Тема 5. Визначення наслідків впливу внутрішнього імпульсного навантаження на корпусні елементи конструкцій з композитних матеріалів

Моделювання нестаціонарного деформування циліндричних, сферичних та складених оболонкових конструкцій з композитних матеріалів з ортотропними властивостями.

Тема 6. Математичне моделювання динамічного відгуку циліндричних, сферичних та складених оболонкових конструкцій з нанокомпозитних матеріалів при імпульсному навантаженні

Основні рівняння для циліндричної, сферичної та складеної сферично-циліндрично-сферичної оболонки з нанокомпозитних матеріалів основних п’яти типів. Моделювання впливу внутрішнього імпульсного навантаження на оболонкові конструкції.

Тема 7. Методика числового аналізу динамічного відгуку складених оболонкових конструкцій при імпульсному навантаженні

Методи і алгоритми числового моделювання вільного і вимушеного руху складених корпусних конструкцій з нанокомпозитних матеріалів основних п’яти типів.

Розділ 3. Моделювання процесів пластичного деформування, що спричинює руйнування конструкції

Тема 8. Моделювання розділення елементів конструкцій внаслідок впливу локального імпульсного навантаження

Моделювання спрацювання шнура, що детонує. Моделювання розділення елементів корпусів ракетно-космічної техніки.

Тема 9. Методика моделювання руйнування окремих елементів в багатокомпонентних конструкціях

Методика визначення руйнуючих навантажень на окремі елементи багатокомпонентної конструкції. Чисельна реалізація та візуалізація процесу руйнування для конструкцій з пружно-пластичних матеріалів.

5. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин						
	усього	у тому числі					
		лекції	практ.	лаб.	сем.	інд.	с.р.
Розділ 1. Моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у конструкціях з полікристалічних матеріалів							
Тема 1. ***Особливості пластичного плину полікристалічних матеріалів в умовах швидкісного деформування***	6	2					4
Тема 2. ***Математичні моделі швидкісного деформування конструкцій***	10	2					8
Тема 3. ***Основні критерії руйнування матеріалу в елементах конструкцій***	6	2					4
Тема 4. ***Основні чисельні методи розв‘язання початково-крайових задач для випадку швидкісного навантаження***	8	2	2				4
Разом за розділом 1	30	8	2				20
Розділ 2. Моделювання процесів швидкісного деформування у конструкціях з композитних та нанокомпозитних матеріалів							
Тема 5. ***Визначення наслідків впливу внутрішнього імпульсного навантаження на корпусні елементи конструкцій з композитних матеріалів***	12	4					8
Тема 6. ***Математичне моделювання динамічного відгуку циліндричних, сферичних та складених оболонкових конструкцій з нанокомпозитних матеріалів при імпульсному навантаженні***	12	4					8

Тема 7. ***Методика числового аналізу динамічного відгуку складених оболонкових конструкцій при імпульсному навантаженні***	12	2	2				8
Разом за розділом 2	36	10	2				24
Розділ 3. Моделювання процесів пластичного деформування, що спричинює руйнування конструкції							
Тема 8. ***Моделювання розділення елементів конструкцій внаслідок впливу локального імпульсного навантаження***	12	4					8
Тема 9. ***Методика моделювання руйнування окремих елементів в багатокомпонентних конструкціях***	12	2	2				8
Разом за розділом 3	24	6	2				16
Усього годин	90	24	6				60

6. Самостійна робота

Метою самостійної роботи є навчитися користуватися навчально-методичними матеріалами, бібліотечними фондами, базами даних наукової літератури і інформаційними джерелами і іншими інформаційними джерелами, складати конспекти, аналізувати матеріал, порівнювати різні наукові концепції та робити висновки. Види самостійної роботи студента: опрацювання лекційного матеріалу; опрацювання тем курсу, які виносяться на самостійне вивчення; виконання завдань для самостійної роботи, відвідування консультацій; підготовка до підсумкового контролю.

Теми для самостійного вивчення

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Методики визначення напружено-деформованого стану в матеріалах внаслідок високошвидкісного навантаження. Фізика процесу пластичного деформування в металах та їх сплавах.	4
2	Рівняння руху. Визначення повної деформації. Співвідношення між напруженнями та деформаціями. Моделі пластичного плину.	8
3	Рівняння стану. Границі текучості та міцності, що враховують динамічні властивості матеріалу конструкції та температурний режим процесу деформування.	4
4	Чисельні методи розв‘язання початково-крайових задач високошвидкісного деформування конструкцій	4
5	Числові дослідження наслідків впливу газодинамічної ударної хвилі на циліндричну пружно-пластичну оболонку.	8
6	Числові дослідження наслідків впливу внутрішнього імпульсного навантаження на циліндричну ортотропну оболонку.	8
7	Числові дослідження наслідків впливу внутрішнього імпульсного навантаження на циліндричну нанокомпозитну оболонку.	8
8	Розрахунок напружено-деформованого стану складних конструкцій внаслідок збирання та експлуатації.	8
9	Чисельна реалізація процесу руйнування для конструкцій кріплень з пружно-пластичних матеріалів.	8
	Разом	60

**** Завдання для самостійної роботи***

1. Дослідити експериментальні методи визначення деформацій в металах та їх сплавах внаслідок швидкісного навантаження.
2. Дослідити математичні моделі визначення еквівалентних напружень за деформаціями, їх швидкістю та температурою, для опису пластичного плину полікристалічних матеріалів.
3. Дослідити границі застосування моделей високошвидкісного деформування, що враховують динамічні властивості матеріалу конструкції та температурний режим процесу деформування.
4. Розробити алгоритм розв'язання задачі деформування пружно-пластичної циліндричної оболонки під впливом газодинамічної ударної хвилі.
5. Розробити алгоритм розв'язання задачі деформування пружно-пластичної складеної оболонки під впливом газодинамічної ударної хвилі.
6. Розробити алгоритм розв'язання задачі деформування ортотропної циліндричної оболонки під впливом внутрішнього імпульсного навантаження.
7. Розробити алгоритм розв'язання задачі деформування нанокомпозитної циліндричної оболонки під впливом імпульсного навантаження.
8. Провести розрахунок напружено-деформованого стану болтового з'єднання з металевих матеріалів при різних температурних режимах.
9. Провести моделювання руйнування болтового з'єднання з пружно-пластичних матеріалів при механічному імпульсному навантаженні.

** За бажанням здобувач може сам скласти перелік завдань для самостійної роботи, адаптувавши їх під своє наукове дослідження, за умови узгодження переліку і змісту завдань з викладачем і науковим керівником.*

7. Методи навчання

При викладанні дисципліни застосовуються словесні, наочні та практичні методи навчання. Словесні та наочні методи навчання використовуються під час лекцій, консультацій, практичні – при здійсненні студентами самостійної роботи. Під час проведення лекцій використовуються такі словесні методи як розповідь і пояснення. До числа наочних методів, які застосовуються при викладанні дисципліни, належать: ілюстрація, демонстрація, робота із програмним комплексом ANSYS.

8. Методи контролю

Поточний контроль теоретичних знань, що отримані здобувачем вищої освіти ступеня доктора філософії здійснюється шляхом опитування та перевірки виконання завдань для самостійної роботи.

Підсумковий контроль проводиться у вигляді заліку.

9. Схема нарахування балів

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="7">Поточний контроль, самостійна робота</td><td rowspan="2">Разом</td><td rowspan="2">Сума</td></tr>
<tr><td colspan="4">Розділ 1</td><td colspan="3">Розділ 2</td><td>Розділ 3</td><td>Індивідуальне завдання</td></tr>
<tr><td>Т1</td><td>Т2</td><td>Т3</td><td>Т4</td><td>Т5</td><td>Т6</td><td>Т7</td><td>Т8</td><td>Т9</td><td rowspan="2">10</td><td rowspan="2">100</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td></tr>
</table>

Т1, Т2 ... – теми розділів.

Критерії оцінювання

Бали поточного контролю за кожною темою складаються з оцінювання відповідей під час усного опитування щодо засвоєння лекційного матеріалу (1 – розуміння окремих положень, 2 – розуміння окремих математичних методів, 3 – досконале засвоєння

математичних методів, 4 – вміння адаптувати засвоєні методи для розв'язання комплексних задач), оцінювання виконання завдання для самостійної роботи (1 – вміння вибрати математичний метод для розв'язання поставленої задачі; 2 – розробка методики розв'язання поставленої задачі, 3 – часткове застосування розробленої методики; 4 – повне застосування методики з отриманням частково помилкових результатів, 5 – вирішення поставленої задачі в цілому, 6 – повне вирішення поставленої задачі з творчим аналізом отриманих результатів).

Критерії оцінювання індивідуального завдання (10 балів): Відсутність помилок в теоретичній частині – 3 бали; Коректність викладок – 3 бали; Послідовність викладок – 2 бали; Логічність викладок – 2 бали.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
50–100	Зараховано
1–49	Не зараховано

10. Рекомендоване методичне забезпечення

1. Конспект лекцій з дисципліни «Математичне моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у сучасних конструкціях» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика галузі знань 11 Математика та статистика (освітньо-наукова програма «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур») [Електронне видання] / Упоряд. М. В. Чернобривко. Харків: ІЕМС НАН України, 2024. 170 с.
2. Методичні вказівки до виконання індивідуальних практичних завдань з дисципліни «Математичне моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у сучасних конструкціях» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика галузі знань 11 Математика та статистика (освітньо-наукова програма «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур») [Електронне видання] / Упоряд. М. В. Чернобривко. Харків: ІЕМС НАН України, 2024. 22 с.
3. Методичні вказівки та перелік завдань для самостійної роботи з дисципліни «Математичне моделювання процесів швидкісного та пластичного деформування у сучасних конструкціях» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика галузі знань 11 Математика та статистика (освітньо-наукова програма «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур») [Електронне видання] / Упоряд. М. В. Чернобривко. Харків: ІЕМС НАН України, 2024. 19 с.

Основна література

1. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. High-Speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods. World Scientific Publishing, 2013. 311 p.
2. Anderson Ted L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition. CRC Press, 2017. 259 p.
3. Heilmaier M., Zimmermann M. (Eds.). Mechanical Behavior of Metallic Materials under Different Loading Conditions. Basel: MDPI, 2024. 216 p.

4. Altenbach H., Brünig M. (Eds.). Inelastic Behavior of Materials and Structures Under Monotonic and Cyclic Loading. Cham: Springer, 2015. 387 p.
5. Афтаназів І. С., Шевчук Л. І., Корендий В. М. та ін. Динаміка та міцність механізмів, машин і споруд в умовах складних навантажень. Частина 3. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2023. 276 с.
6. Лук'яненко С. О. Адаптивні обчислювальні методи моделювання об'єктів з розподіленими параметрами. Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". К. : Політехніка, 2004. 236 с.

Допоміжна література

7. Hallquist, J. O. LS-DYNA Theory manual. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, California 94551. 2019. 680 p.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. Volume 2: Solid Mechanics. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 752 p.
9. Greenberg B. A., Ivanov M. A., Kuzmin S. V., Lysak V. I. Explosive Welding: Processes and Structures. Boca Raton: CRC Press, 2020. 320 p.

Інформаційні ресурси

1. Навчально-методичний комплекс навчальної дисципліни на сайті ipmach.kharkov.ua
2. Мережа Internet.
3. Бібліотека ІЕМС НАН України.