Національна академія наук України

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заступник директора

_____

“25” 12 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Термопружний стан елементів енергетичного обладнання

(назва навчальної дисципліни)

Підготовки докторів філософії

зі спеціальності G4 Енерговиробництво (спеціалізація G4.02 Теплоенергетика)

2025 / 2026 навчальний рік

Робочу програму навчальної дисципліни «Термопружний стан елементів енергетичного обладнання» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Теплоенергетика» підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю G4 Енерговиробництво (спеціалізація G4.02 Теплоенергетика).

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 25 вересня 2025 року, протокол № 9.

Програму схвалено на розширеному засіданні відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні.

Протокол № 4 від 22.09.2025 р.

В. о. завідувача відділу

_____ Орлова Н. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-технічною проблемною радою «Енергомашинобудування. Теплова та відновлювальна енергетика. Екологія».

Протокол № 6 від 25.09.2025 р.

Заступник голови НТПР _____

_____ Костіков А. О.
(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 деформування у сучасних конструкціях з урахуванням впливу температури, 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

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК2. Здатність працювати в міжнародному контексті.

ФК1. Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукові результати, які створюють нові знання у сфері теплоенергетики та дотичних до неї міждисциплінарних напрямах.

ФК4. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру у сфері теплоенергетики, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

ФК5. Здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проекти в теплоенергетиці та дотичні до неї міждисциплінарні проекти, лідерство під час їх реалізації.

ФК8. Здатність проводити обчислювальні експерименти з обробкою розрахункових даних, аналізувати та інтерпретувати теплофізичні дані, які отримано розрахунковим та/або експериментальним шляхом.

Програмні результати навчання

ПРН1. Мати передові концептуальні та методологічні знання з теплоенергетики і на межі предметних галузей, а також дослідницькі навички, достатні для проведення наукових і прикладних досліджень на рівні останніх світових досягнень з теплоенергетики, отримання нових знань та/або здійснення інновацій.

ПРН3. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних досліджень, спостережень, тощо і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані.

ПРН4. Розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у теплоенергетиці та дотичних міждисциплінарних напрямах.

Характеристика навчальної дисципліни

Вибіркова освітня компонента	
Кількість кредитів	3
Рік підготовки	2-й
Семестр	2-й
Загальна кількість годин	90
Лекції	22 год.
Практичні, семінарські заняття	8 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
ОК3 Основи інтелектуальної власності
ОК7 Сучасні засоби комп'ютерного моделювання в енергетиці
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 деформування елементів конструкцій з урахуванням впливу температури.

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 деформування у сучасних конструкціях з урахуванням впливу температури.

4. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Моделювання процесів деформування у конструкціях з полікристалічних матеріалів з урахуванням впливу температури

Тема 1. Особливості деформування полікристалічних матеріалів в умовах аварійного навантаження.

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

Тема 2. Математичні моделі деформування та руйнування елементів конструкцій

Рівняння руху. Визначення повної деформації. Співвідношення між напруженнями та деформаціями. Моделі пластичного плину полікристалічних матеріалів. Урахування впливу температури. Рівняння стану. Границі текучості та міцності, що враховують динамічні властивості матеріалу конструкції та температурний режим процесу деформування.

Розділ 2. Моделювання процесів деформування у конструкціях з композиційних та нанокомпозиційних матеріалів з урахуванням впливу температури

Тема 3. Деформування корпусних елементів конструкцій з композиційних матеріалів під впливом внутрішнього навантаження

Постановка задачі. Механічні властивості композиційних матеріалів. Моделювання нестаціонарного деформування циліндричних, сферичних та складених оболонкових конструкцій з композиційних матеріалів з анізотропними властивостями. Методики числового аналізу динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій з матеріалів з ортотропними властивостями.

Тема 4. Математичне моделювання динамічного відгуку циліндричних, сферичних та складених оболонкових конструкцій з нанокомпозиційних матеріалів при динамічному навантаженні

Постановка задачі. Механічні властивості нанокомпозиційних матеріалів. Основні рівняння для циліндричної, сферичної та складеної сферично-циліндрично-сферичної

оболонки з нанокомпозиційних матеріалів основних п’яти типів. Моделювання впливу внутрішнього навантаження на оболонкові конструкції. Методики чисельного аналізу динамічного відгуку.

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 деформування у конструкціях з полікристалічних матеріалів з урахуванням впливу температури							
Тема 1. ***Особливості деформування полікристалічних матеріалів в умовах аварійного навантаження.***	16	4					12
Тема 2. ***Математичні моделі деформування та руйнування елементів конструкцій***	26	6	4				16
Разом за розділом 1	42	10	4				28
Розділ 2. Моделювання процесів деформування у конструкціях з композиційних та нанокомпозиційних матеріалів з урахуванням впливу температури							
Тема 3. Д***еформування корпусних елементів конструкцій з композиційних матеріалів під впливом внутрішнього навантаження***	24	6	2				16
Тема 4. ***Математичне моделювання динамічного відгуку циліндричних, сферичних та складених оболонкових конструкцій з нанокомпозиційних матеріалів при динамічному навантаженні***	24	6	2				16
Разом за розділом 2	48	12	4				32
Усього годин	90	22	8				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 динамічного навантаження. Фізика процесу	4

	пластичного деформування в металах та їх сплавах.	
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 швидкісного деформування конструкцій	4
5	Числові дослідження наслідків впливу газодинамічної ударної хвилі на циліндричну пружно-пластичну оболонку.	8
6	Числові дослідження наслідків впливу внутрішнього навантаження на циліндричну ортотропну оболонку.	8
7	Числові дослідження наслідків впливу внутрішнього 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 динамічного 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 швидкісного 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 навантаження.
7. Розробити алгоритм розв’язання задачі деформування нанокомпозитної циліндричної оболонки під впливом 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

Поточний контроль, самостійна робота					Екзамен	Сума
Розділ 1			Розділ 2		Разом		
Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	100	–	100
20	20	20	20	20			

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

Конспект лекцій

Перелік завдань і методичні матеріали для самостійної роботи

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.
7. Лук'яненко С. О. Чисельні методи розв'язування диференційних рівнянь. Національний технічний ун-т України "КПІ". К.: Знання України. 2007. 135 с.

Допоміжна література

8. Hallquist, J. O. LS-DYNA Theory manual. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, California 94551. 2019. 680 p.
9. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. Volume 2: Solid Mechanics. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 752 p.
10. 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 у сховищі Google Drive.
2. Мережа Internet.
3. Бібліотека ІЕМС НАН України.