

# Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

## СИЛАБУС

навчальної дисципліни

«НЕЛІНІЙНА ТЕОРІЯ ОБОЛОНОК З ОТВОРАМИ»

Галузь знань	<i>F Інформаційні технології</i>
Спеціальність	<i>F1 Прикладна математика</i>
Освітня програма	<i>Механіка деформівного твердого тіла і теоретична механіка</i>
Освітній рівень	<i>доктор філософії</i>
Статус дисципліни	<i>вибіркова</i>
Мова викладання	<i>українська</i>
Курс / семестр	<i>2 курс, 3(4) семестр</i>
Кількість кредитів ЄКТС	<i>4 кредити ЄКТС</i>
Розподіл за видами занять та годинами навчання	<i>лекції – 22 год. практичні (семінарські) – 20 год. самостійна робота – 78 год.</i>
Форма підсумкового контролю	<i>залік</i>
Відділ	
Викладач (-і)	<i>доктор фіз.-матем. наук, проф. Євген СТОРОЖУК, к. 7 доктор фіз.-матем. наук, с.н.с. Володимир МАКСИМЮК, к. 13</i>
Контактна інформація викладача (-ів)	<i>e-mail <a href="mailto:stevan@ukr.net">stevan@ukr.net</a>, тел. +38-044-596-77-07 e-mail <a href="mailto:volmak@ukr.net">volmak@ukr.net</a>, тел. +38-044-596-77-43</i>
Дні занять	<i>за розкладом</i>
Консультації	<i>за домовленістю викладача з аспірантом оф-лайн або он-лайн</i>
<b><i>Програма навчальної дисципліни</i></b>	

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

*Як навчав нас Тимошенко, все є або балкою, або оболонкою  
(професійний інженерний фольклор)*

*Навчальна дисципліна вільного вибору аспіранта «Нелінійна теорія оболонок з отворами» є теоретичною та практичною основою сукупності знань, вмінь та компетентностей, що формують профіль фахівця в галузі прикладної математики за спеціалізацією Інституту механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України*

*Метою навчальної дисципліни «Нелінійна теорія оболонок з отворами» є прищеплення знань та вмінь, притаманних прикладній математиці, на основі ступеня магістра зі спеціальності «Прикладна математика» шляхом здобуття ними компетентностей, необхідних для виконання самостійних та оригінальних наукових досліджень за спеціалізацією «механіка», що історично виконуються в Інституті механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, результати яких мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення. Лекційний курс*

супроводжується завданнями, які аспіранти виконують під час практичних занять і самостійної роботи над лекціями. Ці завдання тісно пов'язуються із роботою над дисертацією, підготовкою наукових праць та презентацій на конференції.

**Предметом навчальної дисципліни «Нелінійна теорія оболонок з отворами» є напружено-деформований стан тонкостінних елементів конструкцій з концентраторами напружень при дії статичних навантажень та механічні ефекти, які при цьому виникають.**

**Основними завданнями навчальної дисципліни «Нелінійна теорія оболонок з отворами» є формування знань, практичних навичок та компетентностей відповідно до переліку загальних та фахових компетентностей ОНП, потрібних для проведення самостійних кваліфікованих наукових досліджень.**

**Загальні компетентності:**

- здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу;
- здатність до самостійної роботи, самонавчання та постійного розвитку;
- здатність до використання новітніх інформаційних і комунікаційних технологій, пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел;
- здатність усно і письмово презентувати та обговорювати результати наукових досліджень і інноваційних розробок українською та іноземними мовами;

**Спеціальні (фахові) компетентності:**

- здатність формулювати наукові задачі в галузі механіки деформівного твердого тіла, зокрема в області механіки композитних і неоднорідних середовищ, механіки оболонкових систем, механіки зв'язаних полів у матеріалах і елементах конструкцій, механіки руйнування і втоми матеріалів і елементів конструкцій, в області динаміки та стійкості руху механічних систем, в області структурної механіки матеріалів;
- здатність до створення адекватних розрахункових моделей для розв'язання конкретних задач прикладної математики на основі положень наукових теорій та відомостей про об'єкт дослідження;
- здатність вивчати, розуміти і аналізувати існуючі методи дослідження та оцінювати їхні можливості для подальшого використання при розв'язанні конкретних наукових задач з прикладної математики;
- здатність застосовувати сучасні інформаційні технології, бази даних та інші електронні ресурси, спеціалізоване програмне забезпечення для вирішення задач механіки деформівного твердого тіла та теоретичної механіки;
- здатність до розробки нових алгоритмів розрахунку, побудованих на базі сучасного математичного апарату;
- здатність оцінювати достовірність одержаних результатів, отримувати та аналізувати розв'язки завдань роботи, застосовувати результати теоретичних та розрахункових досліджень для формулювання рекомендацій при вирішенні прикладних практичних задач.

**Загальні програмні результати навчання:**

- мати глибинні знання з обраного напряму досліджень. Вміти генерувати нові ідеї, виконувати оригінальні дослідження та досягати наукових результатів, які створюють нові знання в обраному напрямі досліджень;
- володіти знаннями сучасних методів проведення досліджень в області математичного та комп'ютерного моделювання складних механічних систем та явищ;
- орієнтуватись в сучасних інструментах наукових досліджень та на їх основі знаходити оптимальні шляхи розв'язку поставлених задач;
- вміти аналізувати одержані результати і оцінювати їх достовірність та застосовувати результати теоретичних та розрахункових досліджень для формулювання рекомендацій при вирішенні практичних задач;
- вміти ефективно спілкуватись на професійному та соціальному рівнях;
- мати усвідомлення необхідності навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань;
- демонструвати системний науковий світогляд, знання з професійної етики та загальний культурний кругозір, зокрема принципи академічної доброчесності і високої академічної культури.

**Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь). В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен**

**знати:**

- ✓ основні моделі, теореми і методи механіки деформівного твердого тіла;
- ✓ основи теорії оболонок з врахуванням геометричної та фізичної нелінійностей;
- ✓ основні теорії нелінійної пружності анізотропних матеріалів;
- ✓ особливості застосування чисельних методів в нелінійній теорії оболонок з отворами та способи покращення збіжності сіткових методів;

**вміти:**

- ✓ формулювати задачу у механічному сенсі та на рівні математичної моделі;
- ✓ виводити основні рівняння нелінійної теорії оболонок в диференціальній та інтегральній формі;
- ✓ розв'язувати нелінійні задачі статички для оболонок, ослаблених отворами, з використанням сучасних чисельних методів і програмних засобів;
- ✓ аналізувати аналітичні та чисельні розв'язки, встановлювати закономірності напружено-деформованого стану, робити висновки з виявленням механічних ефектів.

## **2. Пререквізити та пост реквізити (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Дисципліна «Нелінійна теорія оболонок з отворами» належить до природничо-наукового циклу підготовки освітньо-кваліфікаційного рівня «доктор філософії» за спеціальністю «Прикладна математика» і в структурно-логічній схемі навчання відноситься до блоку вибіркових дисциплін.

*Для успішного засвоєння дисципліни «Нелінійна теорія оболонок з отворами» аспіранти повинні володіти методами математичного аналізу, теорії диференціальних рівнянь, диференціальної геометрії, лінійної алгебри, математичної фізики, обчислювальної математики, механіки суцільних середовищ, теорії пружності, теорії пластичності, механіки анізотропних матеріалів та обов'язкових курсів освітньо-наукової програми, які вивчаються на першому курсі аспірантури.*

*В результаті вивчення дисципліни «Нелінійна теорія оболонок з отворами» аспіранти отримують необхідні знання з основних положень і методів математичного та чисельного моделювання концентрації напружень в оболонкових елементах конструкцій, ослаблених отворами, з врахуванням нелінійних властивостей матеріалів (пластичності) і особливостей деформування (великих прогинів).*

### **3. Зміст навчальної дисципліни**

#### **Змістовний модуль 1. Ізотропні оболонки з отворами при статичному навантаженні**

*Тема 1. Теорія тонких пружнопластичних оболонок з отворами.*

*Тема 2. Теорія гнучких оболонок з отворами.*

*Тема 3. Крайові задачі для оболонок з отворами при сумісному врахуванні нелінійностей.*

#### **Змістовний модуль 2. Композитні оболонки з отворами при статичному навантаженні**

*Тема 4. Теорія нелінійної пружності анізотропних матеріалів.*

*Тема 5. Класична теорія тонких нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Кірхгофа–Лява).*

*Тема 6. Уточнена теорія нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Тимошенка).*

#### **Змістовний модуль 3. Чисельні методи розв'язання нелінійних задач статичної оболонки з отворами**

*Тема 7. Сіткові методи в задачах статичної теорії тонких оболонок.*

*Тема 8. Методи лінеаризації фізично і геометрично нелінійних задач статичної оболонки.*

*Тема 9. Загальні математичні методи.*

*Тема 10. Тестові задачі для чисельних методів розв'язання нелінійних задач статичної теорії оболонок.*

*Тема 11. Способи покращення збіжності сіткових методів.*

### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

#### **Основна література:**

1. Бігун Я.Й. Числові методи: навч. посібник. – Чернівці: Чернівець. нац. ун-т, 2018. – 436 с.

2. Григоренко Я.М., Будак В.Д., Григоренко О.Я. Розв'язання задач теорії оболонок на основі дискретно-континуальних методів. – Миколаїв: Іліон, 2010. – 294 с.
3. Зражевський Г.М. Чисельні методи в задачах механіки. Частина I. Теоретична та прикладна механіка: Навчально-методичний посібник. – Київ: Вид-во КНУ, 2020. – 135 с.
4. Клименко Д.В., Максимюк В.А., Сторожук Є.А., Чернишенко І.С. Чисельне моделювання нелінійно-пружного стану днища паливного бака ракети з урахуванням реальної зсувної жорсткості композитного матеріалу // 2025. – **61**, №1. – С. 3 – 13.
5. Максимюк В.А., Сторожук Є.А., Чернишенко І.С. Врахування нелінійно-пружних властивостей композитних матеріалів при розрахунку оболонкових елементів ракет з отворами // Прикл. механіка. – 2023. – **59**, №5. – С. 61 – 80.
6. Amabili Marco. *Nonlinear Mechanics of Shells and Plates in Composite, Soft and Biological Materials*. – Cambridge: University Press, 2018. – 567 p.
7. Bisch Philippe. *Shell Mechanics: Theory and Applications*. – Taylor & Francis Group, 2024. – 536 p.
8. Maksimyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. *Variational finite-difference methods in linear and nonlinear problems of the deformation of metallic and composite shells (review)* // *Int. Appl. Mech.* – 2012. – 48, N 6. – P. 613 – 687.
9. Maksimyuk V.A. *Locking Phenomenon in Computational Methods of the Shell Theory* // *Int. Appl. Mech.* – 2020. – 56, N 3. – P. 347–350.
10. Chapelle D., Bathe K.-J. *The Finite Element Analysis of Shells – Fundamentals*. – Springer, 2011. – 410 p.
11. Pilkey W.D., Pilkey D.F. *Peterson's Stress Concentration Factors*. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – 560 p.
12. Reddy J.N. *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. – Oxford: University Press, 2016. – 721 p.

#### **Додаткова література:**

13. Гребенюк С. М., Гоменюк С. І. Чисельні методи розв'язання механічних задач: навчальний посібник для здобувачів третього освітньо-наукового рівня спеціальності «Прикладна математика» освітньо-наукової програми «Прикладна математика». – Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2022. – 80 с.
14. Загорюлько А.В. Чисельні методи у механіці: навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 186 с.
15. Кудін О.В., Сторожук Є.А., Чопоров С.В. Наближені аналітичні та чисельні методи аналізу міцності тришарових тонкостінних конструкцій. – Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 2019. – 160 с.
16. Мосаковський М.С. Теорія пружності, пластичності і повзучості: Підручник. – Київ: Вища школа, 2002. – 308 с.
17. Наука для космічної промисловості. Інформаційний бюлетень координаційної ради з організації спільних робіт ДП «КБ «Південне»» і наукових установ НАН України. – 2020. – № 1 – 2. – 58 с.
18. Сторожук Є.А. Сумісні скінченні елементи з векторною апроксимацією невідомих для розрахунку тонких оболонок складної геометрії // Доповіді НАН України. – 2020. – №1. – С. 39 – 48.

19. *Aviation Maintenance Technician Handbook—Airframe. Vol. 1 / by U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. – Newcastle, WA: Aviation Supplies & Academics, 2012. – 588 p. – (FAA-H-8083-31, FAA Handbooks series).*
20. *Guz A.N., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Nonlinear Two-Dimensional Static Problems for Thin Shells with Reinforced Curvilinear Holes // Int. Appl. Mech. – 2009. – 45, N 12. – P. 1269 – 1300.*
21. *Maksymyuk, V., Storozhuk, E., Chernyshenko, I. (2023). Analytical and Numerical Solution of Static Problems of Non-Circular Cylindrical Shells. In: Guz, A.N., Altenbach, H., Bogdanov, V., Nazarenko, V.M. (eds) Advances in Mechanics. Advanced Structured Materials, vol 191. Springer, Cham. – P. 343 – 366.*

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни(освітнього компонента)

#### Лекційні заняття

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	<p><b>Тема 1. Теорія тонких пружнопластичних оболонок з отворами.</b>  Основні поняття і гіпотези теорії тонких оболонок. Закон зміни переміщень по товщині оболонки. Деформація серединної поверхні тонкої оболонки. Дослідження властивостей матеріалів при непружному деформуванні. Співвідношення теорії малих пружнопластичних деформацій і теорії течії з ізотропним зміцненням для тонких оболонок. Внутрішні зусилля і моменти. Варіаційне рівняння Лагранжа для пружнопластичних оболонок. Диференціальні рівняння рівноваги. Крайові умови в задачах теорії тонких оболонок. Постановка задачі про рівновагу пружнопластичної оболонки з отворами. Підкріплення контуру отвору в оболонці криволінійним стержнем. Методи розв'язання задач пластичності для оболонок з отворами.</p>
	<p><b>Тема 2. Теорія гнучких оболонок з отворами.</b>  Геометричні співвідношення нелінійної теорії оболонок в квадратичному наближенні. Співвідношення пружності. Варіаційне рівняння принципу можливих переміщень для гнучких оболонок. Розв'язувальні рівняння в переміщеннях для оболонок з отворами при врахуванні скінченних прогинів. Граничні умови в задачах теорії тонких гнучких оболонок. Постановка геометрично нелінійної задачі статички для ізотропної оболонки з отворами. Методи розв'язання геометрично нелінійних задач для оболонок з отворами.</p>
	<p><b>Тема 3. Крайові задачі для оболонок з отворами при сумісному врахуванні нелінійностей.</b>  Постановка фізично і геометрично нелінійних задач статички для оболонок з отворами. Вирази для деформацій серединної поверхні оболонки у векторній формі. Варіаційне рівняння Лагранжа для гнучких оболонок при деформуванні за межею пружності. Розв'язувальні рівняння в переміщеннях для оболонок з отворами при сумісному врахуванні нелінійностей.</p>

	<i>Наближенні методи розв'язання фізично і геометрично нелінійних задач для оболонок з отворами при дії статичного навантаження.</i>
<b>2</b>	<b>Тема 4. Теорія нелінійної пружності анізотропних матеріалів.</b> <i>Теорія течії Мізеса. Теорія течії Ломакіна. Інтегрування нелінійних рівнянь за простого навантаження. Методика побудови нелінійної функції зміцнення на основі експериментів.</i>
	<b>Тема 5. Класична теорія тонких нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Кірхгофа–Лява).</b> <i>Реалізація геометричних гіпотез Кірхгофа–Лява методом множників Лагранжа. Внутрішні зусилля і моменти у випадку дискретно змінної товщини оболонки. Метод обернення нелінійних фізичних співвідношень. Варіаційне рівняння Лагранжа для нелінійно-пружних оболонок і його лінеаризація. Ефект мембранного виродження в чисельних методах і шляхи його подолання.</i>
	<b>Тема 6. Уточнена теорія нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Тимошенка).</b> <i>Класифікація композитних оболонок залежно від товщини та властивостей матеріалу. Чисельні ефекти мембранного та зсувного виродження в розрахунках оболонок. Варіанти проблемно-орієнтованих лінеаризованих змішаних функціоналів.</i>
<b>3</b>	<b>Тема 7. Сіткові методи в задачах статичної теорії тонких оболонок.</b> <i>Метод скінченних різниць. Варіаційно-різницевий метод. Метод скінченних елементів.</i>
	<b>Тема 8. Методи лінеаризації фізично і геометрично нелінійних задач статичної.</b> <i>Метод пружних розв'язків. Метод простої ітерації. Метод Ньютона-Канторовича. Метод покрокового навантаження. Метод продовження за параметром.</i>
	<b>Тема 9. Загальні математичні методи.</b> <i>Чисельне диференціювання. Чисельне інтегрування. Методи розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь.</i>
	<b>Тема 10. Тестові задачі для чисельних методів розв'язання нелінійних задач статичної теорії оболонок.</b> <i>Аналitичні розв'язки для кільця, арки, панелі, балки, даху, довгої циліндричної оболонки овального перерізу, сферичної оболонки з круговим отвором. Аналітично-чисельні розв'язки для довгої циліндричної оболонки довільного некругового (еліптичного, параболічного, тощо) поперечного перерізу. Чисельні розв'язки для пружнопластичної сферичної оболонки з круговим отвором.</i>
	<b>Тема 11. Способи покращення збіжності сіткових методів.</b> <i>Використання змішаних функціоналів. Використання векторних співвідношень для деформацій. Використання точок надзбіжності. Скорочене інтегрування і подвійна апроксимація деформацій в методі скінченних елементів.</i>

### Практичні заняття

№	Назва теми занять та перелік основних питань
<b>1</b>	<b>Тема 1. Теорія тонких пружнопластичних оболонок з отворами.</b>

	<i>Побудова розв'язувальних рівнянь в переміщеннях для пружнопластичної сферичної оболонки, яка ослаблена криволінійним отвором і навантажена рівномірним внутрішнім тиском.</i>
	<b>Тема 2. Теорія гнучких оболонок з отворами.</b> <i>Побудова розв'язувальних рівнянь в переміщеннях для гнучкої циліндричної оболонки, яка ослаблена прямокутним отвором і навантажена осьовими розтягувальними силами.</i>
	<b>Тема 3. Крайові задачі для оболонок з отворами при сумісному врахуванні нелінійностей.</b> <i>Побудова розв'язувальних рівнянь в переміщеннях, які описують деформування за межею пружності гнучкої конічної оболонки з круговим отвором за дії рівномірного внутрішнього тиску.</i>
2	<b>Тема 4. Теорія нелінійної пружності анізотропних матеріалів.</b> <i>Побудова нелінійної функції зміцнення для ортотропного органопластика на основі експериментальних даних (діаграм деформування) і визначення його фізико-механічних параметрів, які характеризують лінійну та нелінійно-пружну стадії деформування.</i>
	<b>Тема 5. Класична теорія тонких нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Кірхгофа–Лява).</b> <i>З використанням співвідношень моделі Кірхгофа–Лява побудова розв'язувальних рівнянь в переміщеннях, які описують нелінійно-пружний стан ортотропної сферичної оболонки з еліптичним отвором за дії рівномірного внутрішнього тиску.</i>
	<b>Тема 6. Уточнена теорія нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Тимошенка).</b> <i>На основі співвідношень моделі Тимошенка побудова розв'язувальних рівнянь в переміщеннях, які описують нелінійно-пружний стан органопластикової циліндричної оболонки з круговим отвором за дії рівномірно розподілених на торцях осьових зусиль.</i>
3	<b>Тема 7. Сіткові методи в задачах статичної теорії тонких оболонок.</b> <i>Побудова варіаційно-різницевим методом скінченно-різницевих рівнянь рівноваги для ортотропної пластини з прямокутним отвором за дії поверхневого навантаження.</i>
	<b>Тема 8. Методи лінеаризації фізично і геометрично нелінійних задач статичної.</b> <i>Розв'язання методом пружних розв'язків фізично нелінійної задачі статичної для ортотропної еліпсоїдальної оболонки з круговим отвором за дії контурного навантаження.</i>
	<b>Тема 11. Способи покращення збіжності сіткових методів.</b> <i>Подолання мембранного та зсувного замикання при розрахунку циліндричної оболонки некругового перерізу з використанням способів покращення збіжності сіткових методів.</i>

## 6. Самостійна робота аспіранта

№	Назви тем і питань, що виносяться на самостійне опрацювання та посилання на навчальну літературу	Кількість годин СРС
---	--	---------------------

1	<p><b>Тема 1. Теорія тонких пружнопластичних оболонок з отворами.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Закон зміни переміщень по товщині оболонки.</li> <li>• Дослідження властивостей матеріалів при непружному деформуванні.</li> <li>• Підкріплення контуру отвору в оболонці криволінійним стержнем.</li> <li>• Методи розв'язання крайових задач для пружнопластичних оболонок з отворами.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 1, 2, 6–8, 11; додаткова – 15, 16, 19–21.</p>	8
	<p><b>Тема 2. Теорія гнучких оболонок з отворами.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Методи розв'язання геометрично нелінійних задач для оболонок з отворами.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 1, 2, 6–8; додаткова – 20.</p>	6
	<p><b>Тема 3. Крайові задачі для оболонок з отворами при сумісному врахуванні нелінійностей.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Вирази для деформацій середньої поверхні оболонки у векторній формі.</li> <li>• Наближенні методи розв'язання фізично і геометрично нелінійних задач для оболонок з отворами при дії статичного навантаження.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 1, 6, 12; додаткова – 20.</p>	8
2	<p><b>Тема 4. Теорія нелінійної пружності анізотропних матеріалів.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Теорія пластичності ортотропного матеріалу з ізотропним зміцненням (теорія Хілла).</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 4, 5; додаткова – 16, 17, 19.</p>	6
	<p><b>Тема 5. Класична теорія тонких нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Кірхгофа–Лява).</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Методи розв'язання фізично нелінійних задач для ортотропних оболонок з отворами.</li> <li>• Ефект мембранного виродження в чисельних методах і шляхи його подолання.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 1, 2, 6, 8–10; додаткова – 20, 21.</p>	8

	<p><b>Тема 6. Уточнена теорія нелінійно-пружних оболонок з отворами (модель Тимошенка).</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Методи розв'язання фізично нелінійних задач для ортотропних оболонок з отворами.</li> <li>• Ефект зсувного виродження в чисельних методах і шляхи його подолання.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 2, 4, 8, 9; додаткова – 21.</p>	8
3	<p><b>Тема 7. Сіткові методи в задачах статичної теорії тонких оболонок.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Реалізація граничних умов у методі скінченних різниць, варіаційно-різницевого методі та методі скінченних елементів.</li> <li>• Види скінченних елементів.</li> <li>• Прикладні програми ANSYS та COMSOL.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 1, 3, 7, 8, 10, 12; додаткова – 13, 18, 20.</p>	6
	<p><b>Тема 8. Методи лінеаризації фізично і геометрично нелінійних задач статичної.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Метод додаткових деформацій.</li> <li>• Метод змінних параметрів пружності.</li> <li>• Особливості лінеаризації фізично і геометрично нелінійних задач статичної у випадку варіаційної постановки задач.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 1, 4, 5, 8, 10, 12; додаткова – 20.</p>	8
	<p><b>Тема 9. Загальні математичні методи.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Формули чисельного диференціювання підвищеної точності.</li> <li>• Квадратурні формули найвищого алгебраїчного степеня точності.</li> <li>• Ітераційні методи розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 2, 3, 6; додаткова – 13, 14.</p>	6
	<p><b>Тема 10. Тестові задачі для чисельних методів розв'язання нелінійних задач статичної теорії оболонок.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p>	6

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Аналітичний (точний) розв'язок геометрично нелінійної задачі для довгої циліндричної панелі овального поперечного перерізу.</li> <li>• Аналітично-чисельний розв'язок геометрично нелінійної задачі для довгої циліндричної панелі довільного некругового поперечного перерізу.</li> <li>• Аналітично-чисельний розв'язок фізично нелінійної задачі для довгої циліндричної оболонки довільного некругового поперечного перерізу.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 1–3, 9–12; додаткова – 13, 14, 20, 21.</p>	
	<p><b>Тема II. Способи покращення збіжності сіткових методів.</b></p> <p>1. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>2. Опрацювання матеріалу, який винесено на самостійне вивчення:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Подолання товщинного замикання при розрахунку оболонок тривимірними скінченними елементами.</li> <li>• Способи покращення збіжності сіткових методів при розрахунку елементів конструкцій із мало стисливих або нестисливих матеріалів.</li> <li>• Способи покращення збіжності в методі скінченних елементів.</li> </ul> <p><b>Література:</b> основна – 4, 8–10; додаткова – 20, 21.</p>	8

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

#### **Правила відвідування занять**

*Відвідування лекцій та практичних занять не оцінюється. Разом з тим аспірантам бажано відвідувати усі заняття, оскільки на них викладається теоретичний і практичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для розрахунків реальних об'єктів, складання заліку.*

#### **Пропущені заняття**

*Пропущені заняття мають бути відпрацьовані самостійно з використанням наявних навчальних матеріалів, а за необхідності – з консультацією викладача. Пропущені контрольні заходи мають бути виконані під час консультацій до моменту складання заліку.*

#### **Політика щодо 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.*

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

**Види контролю та бали за кожен елемент контролю:**

<i>№</i>	<i>Контрольний захід</i>	<i>Бали</i>
<i>1</i>	<i>Поточний контроль</i>	
<i>1.1</i>	<i>Експрес-контроль</i>	<i>15</i>
<i>1.2</i>	<i>Відповіді на практичних заняттях</i>	<i>15</i>
<i>1.3</i>	<i>Модульні контрольні роботи</i>	<i>30</i>
<i>2</i>	<i>Семестровий контроль (залік)</i>	<i>40</i>
<i>Разом</i>		<i>100</i>

**Експрес-контроль** проводиться з метою перевірки якості роботи аспіранта в аудиторії і самостійної роботи в поза аудиторний час шляхом усного опитування чи самостійних письмових робіт тривалістю 10 – 30 хвилин або індивідуальних домашніх завдань протягом семестру. Проводиться декілька раз (3 - 5) з максимальною сумарною оцінкою у 15 балів.

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

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

**Рейтинг** 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.

### Відповідність системи оцінювання Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України шкалі оцінювання ЄКТС та національній системі оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою
		для заліку
90 – 100	<b>A</b>	відмінно
82-89	<b>B</b>	добре
74-81	<b>C</b>	
64-73	<b>D</b>	задовільно
60-63	<b>E</b>	
35-59	<b>FX</b>	незадовільно з можливістю повторного складання
0-34	<b>F</b>	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

*Більш детальну інформацію щодо компетентностей, результатів навчання, методів навчання, форм оцінювання, самостійної роботи наведено у робочій програмі навчальної дисципліни, див. сайт Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України*

*Силабус ухвалено на засіданні Науково -методичної ради Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України « 3 » червня 2025 р., протокол № 3*

*Силабус затверджено на засіданні Вченої ради Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України « 26 » червня 2025 р., протокол № 9*