



ТЕОРІЯ ПЛАСТИЧНОСТІ ТА ПОВЗУЧОСТІ

2. ТЕОРІЯ ПОВЗУЧОСТІ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітня програма	Динаміка і міцність машин НН ММІ
Статус дисципліни	Основна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	IV-й курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	135 годин / 4,5 кредитів (лекції – 36 год.; практичні заняття – 36 год.; самостійна робота – 63 год.)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	http://rozklad.kpi.ua/Schedules/ScheduleGroupSelection.aspx
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>член-кор. НАН України, д.т.н., професор, Бобир Микола Іванович, m.bobyr@ukr.net</i> Практичні: <i>к.т.н., доцент, Можаровський Валерій Миколайович, vmagor@ukr.net.</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Дисципліна вивчає: основи методів розрахунків відповідальних елементів конструкцій різного призначення з врахуванням незворотніх деформацій повзучості. При цьому вивчається граничний стан конструкційного матеріалу на рівні границь текучості та міцності. Окрему увагу приділено технологічним задачам теорії повзучості.

Основну увагу приділяється фізичним рівнянням конструкційних металічних матеріалів (ізотропних та анізотропних). Показано взаємозв'язок механічних характеристик матеріалів та кінетики накопичення розсіяних руйнувань з врахуванням їх реологічних властивостей, описано основні методи розв'язку задач теорії повзучості.

Кожний розділ супроводжується розв'язком типових інженерних задач по визначенню граничних станів конструктивних елементів з врахуванням термосилового навантаження та часу.

Курс складається із лекційних та практичних занять, що дозволяє студентам оволодіти практичними навичками розрахунку типових елементів та вузлів конструкцій, які використовуються в авіакосмічній галузі, енерго- та транспортному машинобудуванні, а також інших наукоємних і високотехнологічних галузях машинобудівного комплексу. Заключним етапом вивчення даного курсу є складання екзамену.

Метою навчальної дисципліни, є вивчення основних резервних властивостей конструкційних матеріалів, їх граничного стану, а також проєктування вискоєфективних технологій виготовлення

відповідальних елементів конструкцій різного призначення. Після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати наступні результати навчання :

Знання:

- несучої спроможності конструкційних матеріалів за межами пружності та з врахуванням часу;
- граничного стану матеріалів та елементів конструкцій різного призначення;
- теорії повзучості;
- залишкових напружень та деформацій;
- наближених методів розв'язування задач теорії повзучості.

Уміння:

- правильно визначити граничний стан матеріалів з врахуванням незворотніх деформацій;
- правильно визначити граничні умови;
- правильно застосувати наближені методи розв'язування задач теорії короткочасної повзучості;
- розв'язувати актуальні інженерні задачі повзучості;
- використовувати в роботі електронні посібники, вітчизняну та іноземну технічну літературу.

Навички:

- правильно визначити граничний стан матеріалів з врахуванням незворотніх деформацій;
- розв'язування задач проектування та розрахунку граничного стану типових несучих елементів різного призначення;
- розв'язування технологічних задач теорії короткочасної повзучості;
- самостійного розуміння можливості застосування аналітичних або наближених методів розрахунку;
- визначення параметрів і критеріїв розсіяного руйнування конструктивних елементів;
- роботи з навчально-науковою та довідковою літературою.
-

Загальні компетентності (ЗК)	
ЗК 2	Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.
ЗК 4	Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

Фахові компетентності спеціальності (ФК)	
ФК 1	Здатність аналізу матеріалів, конструкцій та процесів на основі законів, теорій та методів математики, природничих наук і прикладної механіки.
ФК 2	Здатність робити оцінки параметрів працездатності матеріалів, конструкцій і машин в експлуатаційних умовах та знаходити відповідні рішення для забезпечення заданого рівня надійності конструкцій і процесів, в тому числі і за наявності деякої невизначеності.
ФК 14	Здатність оптимізувати конструкцію устаткування, машини, агрегату, вузла, тощо з точки зору її міцності, надійності та вартості.
ФК 15	Здатність коректно визначати граничні умови та створювати розрахункові моделі реальної конструкції з урахуванням зовнішнього експлуатаційного навантаження
ФК 16	Здатність реалізовувати та застосовувати на практиці основні методи та підходи теорії пружності та пластичності з точки зору оцінки граничних станів елементів конструкцій та обладнання.

Програмні результати навчання	
РН 3	Виконувати розрахунки на міцність, витривалість, стійкість, довговічність, жорсткість деталей машин;
РН 4	Оцінювати надійність деталей і конструкцій машин в процесі статичного та динамічного навантаження;
РН 18	Знання сучасних пакетів прикладних програм для розрахунку на міцність, жорсткість та стійкість елементів машинобудівних конструкцій.
РН 21	Знання сучасних чисельних методів.
РН 25	Знання теорії пластичності і повзучості
РН 26	Уміння синтезувати алгоритми вирішення науково-технічних завдань з використанням сучасних технічних і програмних інформаційних засобів реалізації підтримки наукової та технічної діяльності
РН 28	Уміння готувати вихідні дані для обґрунтування технічних рішень, застосовувати стандартні методики розрахунків при проектуванні елементів машинобудівних конструкцій

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни

Наявність знань, умінь та навичок базових дисциплін освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю 131 Прикладна механіка або суміжними спеціальностями, який включає дисципліни Вища математика, Механіка матеріалів і конструкцій, Теорія пружності, Теорія пластичності.

Знання, здобуті студентами при вивченні цієї дисципліни, можуть бути використані в подальшому при виконанні бакалаврської і магістерської дисертації.

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Основні положення та підходи в теорії повзучості. Несуча здатність елементів конструкцій.

Тема 2. Теорія напружень.

Тема 3. Теорія деформацій.

Тема 4. Залежність між деформаціями та напруженнями в межах і за межами пружності.

Тема 5. Умови початку пластичності для анізотропних конструкційних матеріалів.

Тема 6. Повзучість. основні положення та гіпотези.

Тема 7. Технічні теорії повзучості.

Тема 8. Усталена і неусталена повзучість.

Тема 9. Методи розв'язування задач усталеної повзучості.

Тема 10. Методи розв'язування задач неусталеної повзучості.

Тема 11. Тривала міцність. Методи визначення довговічності.

Тема 12. Вязкопружність.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. Фернаті, П. В. Повзучість нелінійно-в'язкопружних матеріалів за умов нестационарного одновісного навантаження. НТУУ «КПІ», 2012. <https://discovery.kpi.ua/Record/dspace.elakpi-123456789-37356>

2. Приходько Р.П., Кучер М.К. Моделювання процесів повзучості і тривалої міцності жароміцних матеріалів.- Національна академія наук України "Інститут проблем міцності ім. Г.С Писаренка", Київ, 2014 .<https://discovery.kpi.ua/Record/dspace.elakpi-123456789-9705>
3. Можаровський, М С. Теорія пружності, пластичності і повзучості: підручник для студентів механічних і машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів. Київ: Вища школа, 2002. <https://discovery.kpi.ua/Record/000135233>
4. Львов, Г. І, С. В Лисенко С. В.. Довготривала міцність нерівномірно нагрітих елементів конструкцій. 2008.<https://discovery.kpi.ua/Record/000314594>

Додаткова література

1. Писаренко Г.С., Можаровський М.С. Рівняння та крайові задачі теорії пластичності і повзучості / К.: Наукова думка, 1989. – 493 с.
2. Можаровський М.С., Качаловська Н.Е. Методи та алгоритми розв'язку крайових задач / К.: Вища школа, 1991. – 287 с.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Теорія повзучості.

Лекція 1. Теорія повзучості як наука. Основні гіпотези.

Лекція 2. Основні рівняння і закони теорії повзучості при лінійному напруженому стані.

Лекція 3. Поняття про границю повзучості.

Лекція 4. Рівняння, які описують криві повзучості.

Лекція 5. Руйнування при повзучості.

Лекція 6. Пошкоджувальність. Лінійний закон додавання пошкоджень.

Лекція 7. Теорії повзучості при одновісному напруженому стані.

Лекція 8. Інженерні теорії повзучості.

Лекція 9. Узагальнені рівняння усталеної повзучості ізотропного матеріалу.

Лекція 10. Розв'язок задач теорії повзучості.

Лекція 11. Поняття про неусталену повзучість.

Лекція 12. Наближені методи розв'язку задач неусталеної повзучості.

Лекція 13. Тривала міцність конструктивних елементів за умов складного напруженого стану.

Лекція 14. Короткочасна повзучість. Основні особливості.

Лекція 15. Фізичні рівняння короткочасної повзучості за умов складного напруженого стану.

Лекція 16. Технологічні задачі короткочасної повзучості.

Практичні заняття

Теорія повзучості.

Практичне заняття №1. Стала повзучість стержня круглого поперечного перерізу.

Практичне заняття №2. Згин прямого бруса в умовах повзучості.

Практичне заняття №3. Крихке руйнування стержня в умовах згину з врахуванням повзучості.

Практичне заняття №4. Усталена повзучість стержня кільцевого поперечного перерізу в умовах кручення.

Практичне заняття №5. Релаксація крутного моменту у поперечному перерізі кільцевого бруса.

Практичне заняття №6. Тривала міцність круглого стержня, що скручується, з врахуванням повзучості.

Практичне заняття №7. Усталена повзучість рівномірного нагрітого диску змінної товщини, що обертається, в умовах усталеної повзучості.

Практичне заняття №8. Статично невизначена шарнірно-стрижнева система в умовах усталеної повзучості.

Практичне заняття №9. Статично невизначена шарнірно-стрижнева система в умовах неусталеної повзучості.

Практичне заняття №10. Усталена повзучість вісесиметричних платівок.

Практичне заняття №11. Неусталена релаксація стержня круглого поперечного перерізу за умов кручення.

Практичне заняття №12. Повзучість оболонок обертання.

Практичне заняття №13. Тривала міцність тонкостінної труби під дією внутрішнього тиску.

Практичне заняття №14. Тривала міцність товстостінної труби.

Практичне заняття №15. Короточасна повзучість та руйнування товстостінних труб за умов термосилового навантаження.

Практичне заняття №16. Неусталена повзучість бруса прямокутного поперечного перерізу.

6. Самостійна робота студента

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1	Теорія деформацій. Кінцеві та малі пружно-пластичні деформації. <i>Передбачається самостійна робота студента згідно завдання викладача.</i>	10
2	Статистичний аспект проблеми деформування та руйнування. <i>Передбачається самостійна робота студента згідно завдання викладача.</i>	10
3	Повзучість та руйнування. Розсіяне руйнування за умов повзучості. <i>Передбачається самостійна робота студента згідно завдання викладача.</i>	12
4	Особливості розв'язування технологічних задач теорії короточасної повзучості. <i>Передбачається самостійна робота студента згідно завдання викладача.</i>	11
5	Вязкопружність. <i>Передбачається самостійна робота студента згідно завдання викладача.</i>	10
6	Критерій високотемпературної тривалої міцності. <i>Передбачається поглиблене вивчення теоретичного матеріалу в рамках вказаної теми.</i>	10

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Правила відвідування занять

Відвідування всіх видів навчальних занять з дисципліни є для студентів бажаним, оскільки дозволяє більш детально ознайомитися з навчальним матеріалом та отримати консультації і роз'яснення за його змістом.

Контроль присутності студентів на заняттях здійснюється викладачем наприкінці заняття. Матеріали пропущених занять мають бути відпрацьованими самостійно.

Правила поведінки на заняттях

Студенти на заняття мають з'являтися своєчасно, без запізнень.

На лекційних заняттях студенти повинні мати конспекти. Під час проведення лекційних занять та на практичних заняттях не допускаються сторонні розмови, користування комп'ютерами, смартфонами, мобільними телефонами без дозволу викладача.

Правила оцінювання практичних занять

Контроль засвоєння матеріалу практичних занять здійснюється шляхом оцінювання виконання студентами індивідуального завдання (див. п.8)

Правила призначення заохочувальних та штрафних балів

Ці правила відображені в рейтинговій системі оцінювання (див. п. 8)

Політика дедлайнів та перескладань

Виконання всіх завдань є обов'язковим для допуску до екзамену з дисципліни. Оцінювання ступені та якості виконання завдання відбувається відповідно до вимог п.8.

Політика щодо академічної доброчесності

В процесі вивчення дисципліни студенти виконують індивідуальні практичні завдання. При цьому студенти і викладачі на взаємній основі керуються принципами академічної доброчесності стосовно неприпустимості плагіату, фальсифікації результатів роботи, корупційних проявів тощо. У разі виявлення плагіату або фальсифікації результатів роботи під час виконання студентом завдань бали за це завдання автоматично анулюються.

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

Протягом семестру виконуються такі види контролю успішності студентів у вивченні дисципліни:

- **Поточний контроль.** Включає оцінювання виконання завдань з практичних занять.
- **Календарний контроль.** Проводиться двічі на семестр, як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.
- **Семестровий контроль.** Екзамен.

Рейтинг студента з дисципліни складається з балів, що він отримує за:

- 1) виконання завдань з практичних занять;
- 2) написання модульної контрольної роботи;
- 3) штрафних та заохочувальних балів.

На час дії воєнного стану та в умовах тривалої відсутності електроенергії в учасників освітнього процесу припиняється нарахування штрафних балів за порушення здобувачами вищої освіти термінів виконання поточних завдань з навчальної дисципліни, визначених відповідним силабусом.

8.1. Система рейтингових (вагових) балів та критерії оцінювання

8.1.1. Виконання завдань практичних занять та курсової роботи

Оцінювання якості виконання завдань практичних занять та курсової роботи, а також степені опанування теоретичного матеріалу, необхідного для виконання цих завдань, здійснюється шляхом аналізу правильності виконання розрахунків та опитування по тематиці виконаних завдань.

Величина коригувального коефіцієнта $K_{гр}$, що враховує якість виконання завдань та точність відповідей на питання наведена у таблиці нижче.

Критерії оцінювання якості виконання практичних задач:

<i>Критерій</i>	<i>Коригувальний коефіцієнт $K_{гр}$</i>
завдання виконано повністю вірно/вірна та повна відповідь на питання	1
завдання виконано з незначними неточностями/відповідь містить деякі неточності або несуттєві помилки (механічна помилка, невірно відображений результат арифметичної дії, необгрунтовано консервативний розрахунок, тощо)	0,85-0,95
завдання виконано зі значними помилками/відповідь неповна (помилка в розмірності, невірно використані довідкові коефіцієнти або параметри, суть питання розкрита поверхнево та у загальних рисах, тощо)	0,75-0,84
завдання виконано, проте використаний невірний підхід/відповідь на питання лише частково торкається суті питання	0,6-0,74
завдання не виконано	0

8.1.2. Модульна контрольна робота

Модульна контрольна робота виконується на останньому практичному занятті та містить 12 теоретичних запитань за матеріалами курсу 11 з яких є тестовими питаннями, що передбачають можливість вибору студентом відповіді на питання з запропонованих варіантів, та одного запитання для самостійної відповіді. Час виконання модульної контрольної роботи становить 15 хвилин. У разі здачі студентом роботи пізніше ніж за 15 хвилин від початку її виконання бали за модульну контрольну роботу не виставляються. Перездача модульної контрольної роботи з метою підвищення балів не передбачена.

Максимальна кількість балів за кожне тестове питання становить 1 бал, за запитання для самостійної відповіді – 2 бали.

Величина коригувального коефіцієнта $K_{кр}$, що враховує точність відповідей на питання наведена у таблиці нижче.

Критерії оцінювання правильності відповідей на питання контрольної роботи:

<i>Критерій</i>	<i>Питання 1-11</i>	<i>Питання 12</i>
	<i>Коригувальний коефіцієнт $K_{кр}$</i>	
Вірна відповідь на питання	1	1
Відповідь містить деякі неточності або несуттєві помилки	-	0,9

Відповідь неповна, відсутні основні або базові моменти, що стосуються суті питання	-	0,75
Відповідь на питання лише частково торкається суті питання	-	0,5
Невірна відповідь на питання	0	0

8.1.3. Заохочувальні бали нараховуються за:

Участь в розробці нових задач з теорії повзучості, допомозі у підготовці наочного лекційного матеріалу, допомозі у створенні електронного методичного матеріалу (за умови виконання навчальної програми з дисципліни) - від +1 до +10 балів.

8.2. Розрахунок шкали (R) рейтингу

Сума набраних рейтингових балів може бути розрахована як:

$$R = \sum_{i=1}^4 (ПЗ_i \times K_{ПЗ_i}) + \sum_{i=1}^{12} (ПЗ_i \times K_{ПЗ_i}) + \sum_{i=1}^{12} (КР_i \times K_{КР_i}) + ЗБ$$

Де $ПЗ_i$ – бали, набрані за виконання практичної частини i -го завдання практичних занять;
 $ПЗ_i$ – бали, набрані за відповіді на теоретичні питання за тематикою завдань практичного заняття;

$КР_i$ – бали, набрані за відповіді на питання модульної контрольної роботи; сума балів, набраних за відповіді на питання модульної контрольної роботи;

$K_{ПЗ}$, $K_{КР}$ – відповідні коригувальні коефіцієнти;

ЗБ – сума заохочувальних балів.

8.3. Атестації

Умовою позитивної першої атестації є отримання не менше 50% з усіх можливих балів за виконанні завдання з початку навчального семестру і до моменту проведення атестації. Умовою позитивної другої атестації є отримання не менше 50% з усіх можливих балів за виконанні завдання за інтервал від першої атестації і до моменту проведення другої атестації.

8.4. Критерії оцінювання:

Набрані протягом навчального семестру бали переводяться до залікової оцінки згідно таблиці:

Бали	Оцінка
100...95	Відмінно
94...85	Дуже добре
84...75	Добре
74...65	Задовільно
64...60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно (виконується залікова робота за умови допуску до заліку)

Невиконані всі завдання ПЗ, кількість набраних балів за завдання ПЗ менша за 30	Не допущено
---	-------------

Студенти, які виконали всі умови допуску до заліку та мають рейтингову оцінку 60 і більше балів, отримують відповідну до набраного рейтингу оцінку без додаткових випробувань. У разі, якщо кількість набраних балів складає менше 60 або студент бажає отримати вищу оцінку за отриману залікову оцінку «Достатньо» або «Задовільно» – виконується залікова робота. При цьому всі набрані бали протягом семестру анулюються і кількість рейтингових балів стає рівною 0. Залікова робота складається з двох теоретичних питань та двох практичних завдань.

Кожне теоретичне питання максимально оцінюється в 20 балів за наступними критеріями:

- повна відповідь на запитання – 20 балів;
- відповідь, що містить незначні неточності – 15-19 балів;
- неповна відповідь – 12-14 балів;
- відповідь відсутня, містить значні неточності – 0-12 балів.

Кожне практичне завдання оцінюється максимально в 30 балів з урахуванням співбесіди з викладачем за наступними критеріями:

- повністю правильно виконане завдання – 30 балів;
- завдання виконане з незначними помилками – 23-29 балів;
- завдання виконане зі значними помилками – 18-23 бали;
- завдання не виконане або містить лише кілька виконаних вірних кроків – 0-18 балів.

У разі, якщо студент бажає отримати вищу оцінку за отриману залікову оцінку «Добре» або «Дуже добре» – проводиться залікова співбесіда з викладачем за матеріалами пройденого курсу, що складається з 5 додаткових базових питань або базових завдань. За результатами співбесіди до рейтингу студента можуть бути додані додаткові бали за кожен вірну відповідь на запитання/кожен вірно виконане завдання. При цьому максимальна кількість балів, що може бути отримана за одне запитання/завдання складає:

$$ЗР = \frac{100 - R}{5}$$

Кожне питання/завдання оцінюється за наступними критеріями:

- повна відповідь на запитання – ЗР балів;
- відповідь, що містить незначні неточності – 0,75*ЗР...0,95*ЗР балів;
- неповна відповідь – 0,65*ЗР...0,75*ЗР балів;
- відповідь відсутня, містить значні неточності – 0...0,6*ЗР балів.

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

ПИТАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ НА ЕКЗАМЕН

Теорія повзучості.

- 1) Теорія повзучості як наука. Основні гіпотези.
- 2) Повзучість та релаксація напружень.
- 3) Основні рівняння повзучості при лінійному напруженому стані.
- 4) Поняття про тривалу міцність.
- 5) Поняття про границю повзучості.
- 6) Границя тривалої міцності.
- 7) Пошкоджуваність. Лінійний закон додавання пошкоджуваності.
- 8) Механічні моделі тіла що деформується.
- 9) Вязкопружна модель Максвелла.
- 10) Вязкопружна модель Фойгта.
- 11) Вязкопружна модель Кельвіна.
- 12) Лінійна теорія спадковості.
- 13) Технічні теорії повзучості при лінійному стані.
- 14) Теорія старіння.
- 15) Теорія течії.
- 16) Теорія зміцнення.
- 17) Теорія повзучості при складному напруженому стані.
- 18) Довготривала міцність при складному напруженому стані.
- 19) Вирішення задач сталої повзучості в швидкостях переміщень.
- 20) Вирішення задач сталої повзучості в напруженнях.
- 21) Теорія повзучості з анізотропним зміцненням.
- 22) Варіаційні принципи в теорії сталої повзучості.
- 23) Варіаційні принципи. Додаткове розсіювання.
- 24) Принцип мінімуму повної потужності.
- 25) Наближений варіаційний метод вирішення задач сталої повзучості.
- 26) Нестала повзучість. Основна система рівнянь.
- 27) Нестала повзучість без урахування пластичних складових.
- 28) Принцип мінімуму додаткової потужності.
- 29) Наближені методи вирішення задач несталої повзучості.
- 30) Особливості короточасної повзучості.
- 31) Основні рівняння короточасної повзучості за умов складного напруженого стану.
- 32) Еквівалентні напруження за умов короточасної повзучості.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Склав професор кафедри ДММ та ОМ, член-кор. НАН України, д.т.н. **Бобир М.І.**

Ухвалено кафедрою ДММ та ОМ (протокол № 11 від 01. 07. 2022 р.)

Погоджено Методичною комісією НН ММІ (протокол № 11 від 29. 08. 2022 р.)