



Теорія пластичної деформації-2. Математичні основи пластичної деформації

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>131 Прикладна механіка</i>
Освітня програма	<i>Технології виробництва літальних апаратів</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)/заочна/дистанційна</i>
Рік підготовки, семестр	<i>3 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредита ECTS</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен</i>
Розклад занять	<i>1,5 пари лекцій на тиждень (всього 36 години лекцій), практичні заняття 1 пара через тиждень (18 годин)</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>д.т.н., професор кафедри ТВЛА Тітов В.А.</i> <i>vat.kpi@gmail.com</i> Практичні: <i>к.т.н., доцент Сабол Сергій Францевич</i> <i>sabol1@ukr.net</i>
Розміщення курсу	<i>Сайт кафедри ТВЛА, Електронний кампус</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Навчальна дисципліна належить до циклу професійної підготовки.

Кредитний модуль «Теорія пластичної деформації-2. Математичні основи пластичної деформації» – це нормативна дисципліна професійної підготовки бакалаврів за спеціальністю **131 Прикладна механіка**, освітньо-професійною програмою **Прикладна механіка пластичності матеріалів** та **Технології виробництва літальних апаратів**. Вивчення дисципліни необхідно для набуття компетенцій з виконання завдань технологічного рівня за ОПП ПМПМ та ОП ТВЛА.

Кредитний модуль «Теорія пластичної деформації-2. Математичні основи пластичної деформації» є логічним продовженням дисципліни «Теорія пластичної деформації-1. Фізико-математичні основи пластичної деформації», в якій викладаються математичні основи феноменологічної теорії пластичних деформацій.

Дисципліна закріплює та розвиває знання студентів щодо напружено-деформованого стану металу при навантаженні тіла довільною системою сил. Вивчаються умови рівноваги та руху металу при пластичній деформації в рамках феноменологічних теорій пружно-пластичних деформацій та теорії пластичної течії металу. В рамках дисципліни розглядаються, також питання граничного напруженого стану та ресурсу пластичності металу при пластичному

деформуванні, вивчаються умови контактного тертя та їх вплив на тіло, що деформується. Студенти отримують знання теоретичних підходів до аналітичного опису напруженого та деформованого стану металу, закономірностей пластичної течії металу під впливом активних та пасивних сил в процесах обробки металів тиском.

Метою кредитного модуля є формування у студентів здатностей: застосовувати знання теоретичних підходів до аналітичного опису напруженого та деформованого стану металу, закономірностей пластичної течії металу під впливом активних та пасивних сил для розв'язання прикладних задач в процесах обробки металів тиском.

Фахові компетентності:

ФК12. Здатність використовувати теорію пластичної течії матеріалів для проектування технологічних процесів та визначення механічних властивостей матеріалів із врахуванням температурних режимів процесу, швидкості деформації матеріалів та тертя.

ФК13. Здатність застосовувати знання теоретичних підходів до аналітичного опису напруженого та деформованого стану металу, закономірностей пластичної течії металу під впливом активних та пасивних сил для розв'язання прикладних задач в процесах обробки металів тиском

Результати навчання: **знання** теоретичних підходів до аналітичного опису напруженого та деформованого стану металу, закономірностей пластичної течії металу під впливом активних та пасивних сил в процесах обробки металів тиском, **уміння:**

- розраховувати інваріанти та тензори напружень;
- розраховувати головні дотичні напруження та нормальні напруження, що діють в площинах головних дотичних напружень;
- будувати круги Мора для об'ємного та плоского напруженого стану;
- розраховувати зміщений об'єм, визначати швидкості переміщень та швидкості деформацій;
- визначати компоненти тензора напружень і деформацій для об'ємного та плоского деформованого стану;
- розраховувати деформації зсуву за рахунок тертя;
- будувати компоненти вектора течії металу;
- будувати діаграми пластичності та визначати механічні схеми деформування
- визначати енергосилові параметри процесу деформування;
- визначати механічні схеми деформування для типових процесів обробки металів тиском, будувати діаграми пластичності,

досвід розв'язання практичних задач для типових процесів обробки металів тиском.

Результати навчання:

РН19. Вміти будувати діаграми пластичності та визначати механічні схеми деформування, визначати енергосилові параметри процесу деформування, визначати механічні схеми деформування для типових процесів обробки металів тиском

РН20. Знати та вміти використовувати теоретичні підходи до аналітичного опису напруженого та деформованого стану металу, закономірностей пластичної течії металу під впливом активних та пасивних сил в процесах обробки металів тиском

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Вивчення дисципліни базується на знаннях, отриманих з дисциплін «Вища математика», «Загальна фізика», «Технологія конструкційних матеріалів», «Матеріалознавство», «Механіка матеріалів і конструкцій». Набуті в результаті вивчення дисципліни знання та навички мають бути застосовані студентами при вивченні професійно-орієнтованих дисциплін «Теорія та процеси заготівельно-штампувального виробництва», «Теорія та процеси гарячого штампування в авіабудуванні», «Технологія холодного об'ємного штампування», «Високошвидкісні методи обробки металів тиском» та інших.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ I. Напружено-деформований стан металу при пластичних деформаціях.

Тема 1.1. Сили і напруження. Напруження в площинах похилих до осей координат.

Тема 1.2. Поняття про тензор напруженого стану. Інваріанти напруженого стану. Еліпсоїд напружень.

Тема 1.3. Головні дотичні напруження. Октаедричні нормальні і дотичні напруження.

Тема 1.4. Плоский напружений стан. Круги Мора. Круги Мора для об'ємного напруженого стану. Лінійний напружений стан.

Тема 1.5. Диференційні рівняння рівноваги.

Тема 1.6. Деформований стан: переміщення, подовження, зсуви, швидкості переміщень

Тема 1.7. Нескінченно малі пластичні деформації. Великі пластичні деформації. Зміщений об'єм.

Тема 1.8. Зв'язок між напруженням і деформаціями. Подібність між тензорами напружень і деформацій.

Тема 1.9. Девіатор тензора напружень. Кутові тензори напружень і деформацій. Плоский деформований стан.

Розділ II. Граничний напружений стан.

Тема 2.1. Фізична природа контактної тертя. Види контактної тертя.

Тема 2.2. Фактори, що впливають на контактне тертя. Експериментальні методи визначення коефіцієнту тертя.

Тема 2.3. Теорія головних дотичних напружень. Енергетична теорія пластичності .

Тема 2.4. Окремі випадки основного рівняння пластичності. Канонічне рівняння пластичності. Коефіцієнт Лоде.

Тема 2.5. Теорія пластичної течії металу. Опис процесу деформації: вектори переміщень та швидкостей переміщень. Швидкість деформацій і деформації.

Тема 2.6. Теорія пластичної течії металу. Рівняння руху. Робота деформації.

Тема 2.7. Теорія пластичної течії металу. Зв'язок напружень і швидкостей деформацій. Середнє напруження.

Тема 2.8. Механічна схема деформування. Вплив схеми напруженого стану на пластичність опір деформуванню та механічні властивості.

Тема 2.9. Основні критерії руйнування металу при пластичній деформації. Ресурс пластичності діаграма пластичності

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. Теорія пластичної деформації-2. математичні основи пластичної деформації: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», освітня програма «Прикладна механіка пластичності матеріалів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.А. Тітов, Н.К. Злочевська. – Електронні текстові дані (1 файл: 0.9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 79 с.

2. Теорія та практика обробки матеріалів тиском / Під ред. Богуслаєва В.О., Бобира М.І., Тітова В.А., Качана О.Я. – Запоріжжя вид. АТ "Мотор Січ", 2016. - 522с.

3. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. Посіб-ник. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2013. –226 с.

4. Високошвидкісні методи обробки металів тиском: Підручник / В.А. Тітов, Ю.Є. Шамарін, А.І. Долматов, В.К. Борисевич, В.О. Маковей, В.М. Алексеєнко – Київ: КВІЦ, 2010. – 304с.

5. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Теорія пластичної деформації», Київ, КПІ, 2010, 66 с.

6. Конспект лекцій з дисципліни Математичні основи пластичної деформації. <https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&show&file=sfwonidvujtldlipnrq>

7. Презентація лекцій з дисципліни Фізико-механічні основи пластичної деформації.

8. Презентація практичних занять з дисципліни Фізико-механічні основи пластичної деформації.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Під час вивчення кредитного модуля Математичні основи пластичної деформації, що включає лекційний курс, практичні заняття, модульну контрольну роботу та самостійну роботу студента, особлива увага приділяється вивченню теоретичних підходів до аналітичного опису напруженого та деформованого стану металу, закономірностей пластичної течії металу під впливом активних та пасивних сил в процесах обробки металів тиском. Практичні заняття дають студентам можливість на практиці отримати досвід розв'язання прикладних задач в процесах обробки металів тиском. Контроль засвоєння отриманих знань та практичних навичок здійснюється під час захисту тем та за допомогою модульних контрольних робіт. Оцінювання знань студентів проводиться за рейтинговою системою відповідно до положень, що є невід'ємною частиною даної програми.

Назви розділів і тем	Кількість годин				
	Всього	у тому числі			
		Лекції	Практичні (семінарські)	Лабораторні (комп'ютерний практикум)	СРС
1	2	3	4	5	6
Розділ 1. Напружено-деформований стан металу при пластичних деформаціях.					
Тема 1. Сили і напруження. Напруження в площинах нахилених до осей координат.	5	2	2		1
Тема 2. Поняття про тензор напруженого стану. Інваріанти напруженого стану. Еліпсоїд напружень.	6	2	2		2
Тема 3. Головні дотичні напруження. Октаедричні нормальні і дотичні напруження.	6	2	2		2
Тема 4. Плоский напружений стан. Круги Мора. Круги Мора для об'ємного напруженого стану. Лінійний напружений стан.	7	3	2		2
Тема 5. Диференційні рівняння рівноваги.	5	2	2		1
Тема 6. Деформований стан: переміщення, подовження, зсуви, швидкості переміщень.	7	3	2		2

1	2	3	4	5	6
Тема 7. Нескінченно малі пластичні деформації. Великі пластичні деформації. Зміщений об'єм.	5	2	2		1
Тема 8. Зв'язок між напруженням і деформаціями. Подібність між тензорами напружень і деформацій.	5	2	2		1
Тема 9. Девіатор тензора напружень. Кутіві тензори напружень і деформацій. Плоский деформований стан.	5	2	2		1
Контрольна робота 1	3	1			2
Разом за розділом 1	55	22	18		15
Розділ 2. Граничний напружений стан					
Тема 1. Фізична природа контактної тертя. Види контактної тертя.	5	2	2		1
Тема 2. Фактори, що впливають на контактне тертя. Експериментальні методи визначення коефіцієнту тертя.	5	2	2		1
Тема 3. Теорія головних дотичних напружень. Енергетична теорія пластичності .	6	2	2		2
Тема 4. Окремі випадки основного рівняння пластичності. Канонічне рівняння пластичності. Коефіцієнт Лоде.	5	2	2		1
Тема 5. Теорія пластичної течії металу. Опис процесу деформації: вектори переміщень та швидкостей переміщень. Швидкість деформацій і деформації.	10	4	2		4
Тема 6. Теорія пластичної течії металу. Рівняння руху. Робота деформації.	5	2	2		1
Тема 7. Теорія пластичної течії металу. Зв'язок напружень і швидкостей деформацій. Середнє напруження.	5	2	2		1
Тема 8. Механічна схема деформування. Вплив схеми напруженого стану на пластичність, опір деформуванню та механічні властивості.	6	2	2		2
Тема 9. Основні критерії руйнування металу при пластичній деформації. Ресурс	9	4	2		3

1	2	3	4	5	6
пластичності. Діаграма пластичності					
Контрольна робота з розділу 2	2	1			2
Разом за розділом 2	59	23	18		18
Екзамен	36				36
Всього годин	120	36	18		66

Практичні заняття

Основні завдання циклу практичних занять закріпити знання студентів щодо напружено-деформованого стану металу при навантаженні тіла довільною системою сил, умов рівноваги та руху металу при пластичній деформації в рамках феноменологічних теорій пружно-пластичних деформацій та теорії пластичної течії металу, отримати досвід розв'язання прикладних задач в процесах обробки металів тиском.

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1.	Розрахунки напружень в площинах нахилених до осей координат. Розрахунки інваріантів тензорів напружень [1] стор.77-95, [2] стор.16-28, [3] стор.30-43.
2.	Розрахунок головних дотичних напружень та нормальних напружень, що діють в площинах головних дотичних напружень. Розрахунок октаедричних напружень. [1] стор.86-95, [2] стор.21-28, [3] стор.30-43.
3.	Побудова кругів Мора для плоского напруженого стану. [1] стор.95-99, [2] стор.57-65.
4.	Побудова кругів Мора для об'ємного напруженого стану. [1] стор.95-99, [2] стор.57-65
5.	Деформований стан. Види деформацій. [1] стор.111-121, [2] стор.36-52, [3] стор.16-30
6.	Визначення переміщень, подовження, зсуву, швидкостей переміщень, швидкостей деформацій. Розрахунок зміщеного об'єму. [1] стор.111-121, [2] стор.36-52, [3] стор.16-30.
7.	Зв'язок між напруженням і деформаціями [1] стор.138-144
8.	Визначення компонент тензора напружень і деформацій для об'ємного та плоского деформованого стану. [1] стор.138-144, [2] стор.53-57.
9.	Оцінка виду контактного тертя. Розрахунок деформацій зсуву за рахунок тертя. Гідродинамічне тертя між заготовкою та оснащенням. [1] стор.159-166, [2] стор.166-190, [3] стор.126-139.
10.	Особливості використання канонічного рівняння пластичності. [1] стор.122-138, [2] стор.76-86.
11.	Особливості опису процесу деформації і побудова компонент вектору течії металу. [3] стор.96-97, [4] стор.51-55.
12.	Визначення енергосилових параметрів процесу деформування. [4] стор.56-60.
13.	Визначення механічних схем деформування для типових процесів обробки металів тиском. Побудова діаграм пластичності. [1] стор.144-155, [2] стор.66-68, 86-97.

Контрольні роботи

Модульна контрольна робота проводиться з метою виявлення знань студентів з розділів дисципліни, розбивається на дві контрольні роботи з першого та другого розділів. Основні цілі

контрольних робіт – контроль за поточним засвоєнням знань, атестація студентів та ін. Результати контрольних робіт враховуються в рейтинговій системі оцінювання результатів навчання.

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота передбачена за всіма темами плану курсу і складається з опрацювання матеріалів лекцій, підготовки до практичних занять та модульних контрольних робіт, іспиту.

Особливу увагу здобувач має приділити вивченню теоретичних підходів до аналітичного опису напруженого та деформованого стану металу, закономірностей пластичної течії металу під впливом активних та пасивних сил в процесах обробки металів тиском.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Політика щодо дедлайнів та перескладання: - у відповідності до загальноуніверситетських вимог, окремі елементи не встановлюються. Перескладання іспиту відбувається із дозволу кафедри/деканату за наявності поважних причин (наприклад: лікарняний).

Політика щодо академічної доброчесності: - у відповідності до загальноуніверситетських вимог, окремі елементи не встановлюються. Списування, запозичення, шахрайство під час оцінювання тощо - не допускаються.

Політика щодо відвідування: - виконання практичних занять та присутність на іспиті є обов'язковим компонентом для оцінювання, під час практичних занять проводяться експрес-опитування та модульні контрольні роботи (обов'язкові складові PCO), а також за навчальну активність слухача нараховуються додаткові бали (додатково до PCO). За об'єктивних причин (наприклад, хвороба, міжнародне стажування та/або інші форс-мажорні ситуації тощо) навчання може відбуватись в on-line формі у відповідності до загальноуніверситетських вимог. Також застосовуються елементи змішаного навчання.

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

Шкала PCO кредитного модуля, семестрова атестація з якого передбачена у вигляді екзамену, формується як сума вагових балів контрольних заходів, проведених протягом семестру RC та вагового балу з екзамену RE. $R=RC + RE$, RC – не менше 60 балів, RE

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

- 1) шість відповідей (кожного студента в середньому) на практичних заняттях;
- 2) захист трьох тем на практичних заняттях;
- 3) модульна контрольна робота, яка розбивається на дві по одній академічній годи-ні;
- 4) відповідь на екзамені.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Робота на практичних заняттях

Ваговий бал –2.

Максимальна кількість балів на всіх практичних заняттях дорівнює:

2 бали x 6 = 12 балів

За умови гарної підготовки і активної роботи на практичному занятті – 2 бали. Одному або двом кращим студентам на кожному практичному занятті може додаватися як заохочування 1 бал.

2. Захист чотирьох тем

Ваговий бал –7.

Максимальна кількість балів:

7 балів x 4 = 28 балів

Критерії оцінювання:

7 балів – повне розкриття питань з теми, яка захищається;

5 бали – помилка з окремих питань, але студент показує розуміння теми;
4 бали – суттєві помилки з питань, які виносяться на контроль;
0 балів – незадовільна відповідь (не відповідає вимогам на 4 бали)

3. Модульний контроль

Ваговий бал –10.

Максимальна кількість балів за 2 контрольні роботи:

10 балів x 2 = 20 балів

Критерії оцінювання:

«відмінно» – 10 балів – повне розкриття всіх питань, які винесені на контрольну роботу;

«добре» – 8 балів – на 75% питань (серед них обов'язково головні) да-но повні відповіді, на 25% часткові;

«задовільно» – 6 балів – неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) та незначні помилки;

«незадовільно» – 0 балів – незадовільна відповідь (не відповідає вимогам на «задовільно»).

Додаткові (заохочувальні) бали не можуть перевищувати 20 балів мах (проставляються за мотивовану активність під час занять по 1 балу за лекцію та участь у написанні тез, статей тощо, участь у науково-дослідній роботі кафедри тощо, до 5 балів за кожну складову).

Необхідною умовою допуску до екзамену є стартовий рейтинг не менше 60 балів.

Екзаменаційна складова шкали дорівнює 40% від R, RE = 40 балів.

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:

RC = 12+28+20 = 60 балів

За результатами навчальної роботи за перші 7 тижнів «ідеальний студент» має набрати 30 балів. На першій атестації (8-й тиждень) студент отримує «атестовано», якщо його поточний рейтинг не менше $0,5(30)=15$ балів.

За результатами 13 тижнів навчання «ідеальний студент» має набрати 60 балів. На другій атестації (14-й тиждень) студент отримує «атестовано», якщо його поточний рейтинг не менше 30.

На екзамені студенти виконують письмову контрольну роботу. Кожне завдання містить два теоретичних питання і одне практичне. Перелік питань наведений у методичних рекомендаціях до засвоєння кредитного модуля.

Кожне теоретичне питання оцінюється у 10 балів, а практичне – 20 балів.

Система оцінювання теоретичних питань:

– «відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 10-9 балів;

– «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації, або незначні неточності) – 8-7 балів;

– «задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – 6 балів;

– «незадовільно», незадовільна відповідь – 0 балів.

Система оцінювання практичного запитання:

– «відмінно», повне безпомилкове розв'язування завдання – 20-18 балів;

– «добре», повне розв'язування завдання з несуттєвими неточностями – 17-15 балів;

– «задовільно», завдання виконане з певними недоліками – 14-12 балів;

– «незадовільно», завдання не виконано – 0 балів.

Семестровий контроль: іспит (в залежності від повноти відповіді у 40 балів мах).

Бали поточного і семестрового контролю складаються, але не можуть перевищувати 100 балів. Сума стартових балів і балів за екзаменаційну контрольну роботу переводиться до екзаменаційної оцінки згідно з таблицею:

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік обов'язкових питань, які виносяться на семестровий контроль:

1. Сили і напруження. Закон парності дотичних напружень.
2. Напруження в площинах нахилених до осей координат. Головні нормальні напруження.
3. Еліпсоїд напружень.
4. Інваріанти напруженого стану.
5. Поняття про тензор напруженого стану. Девіатор напружень. Кутовий тензор напружень.
6. Головні дотичні напруження. Нормальні напруження, що діють в площинах головних дотичних напружень.
7. Октаедричні нормальні і дотичні напруження.
8. Плоский напружений стан. Круги Мора.
9. Круги Мора для об'ємного напруженого стану.
10. Лінійний напружений стан.
11. Диференційні рівняння рівноваги.
12. Деформований стан: переміщення, подовження, зсуви, швидкості переміщень.
13. Нескінченно малі пластичні деформації. Рівняння О.Л. Коші.
14. Великі пластичні деформації. Відносні та логарифмічні деформації.
15. Зміщений об'єм. Фізична суть зміщеного об'єму.
16. Зв'язок між напруженням і деформаціями. Подібність між тензорами напружень і деформацій.
17. Девіатор тензора напружень. Кульові тензори напружень і деформацій. Плоский деформований стан.
18. Теорія головних дотичних напружень. Рівняння пластичності Треска – Сен-Венена. Поверхня пластичності.
19. Енергетична теорія пластичності. Рівняння пластичності Губера – Мізеса – Генки. Поверхня пластичності.
20. Окремі випадки основного рівняння пластичності.
21. Канонічне рівняння пластичності.
22. Коефіцієнт Лоде.

23. Теорія пластичної течії металу. Опис процесу деформації: вектори переміщень та швидкостей переміщень. Рівняння сумісності швидкостей переміщень. Швидкість деформацій і деформації.
24. Теорія пластичної течії металу. Рівняння руху (у векторному та скалярному вигляді).
25. Теорія пластичної течії металу. Робота деформації. (Швидкісна функція. Функція дисипації енергії).
26. Теорія пластичної течії металу. Зв'язок напружень і швидкостей деформацій.
27. Визначення середнього напруження в теорії пластичної деформації (у тензорному вигляді).
28. Механічна схема деформування. Вплив схеми напруженого стану на пластичність, опір деформуванню та механічні властивості.
29. Основні критерії руйнування металу при пластичній деформації. Ресурс пластичності, діаграма пластичності.
30. Закон парності дотичних напружень (вивести).
31. Діаграма пластичності.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Склав д.т.н., професор кафедри ТВЛА Вячеслав Тітов

Ухвалено кафедрою ТВЛА (протокол № 16 від 06.07.2022 р.)

Погоджено Методичною комісією ММІ (протокол № 11 від 29.08.2022 р.)