



## КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий</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)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс магістратури, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>6 кредитів</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен</i>
Розклад занять	<i>1 лекція на тиждень</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>д.т.н., професор, Калюжний Володимир Леонідович, kwl_2011@ukr.net</i> Практичні / Семінарські: <i>науковий ступінь, вчене звання, ПІБ, контактні дані</i> Лабораторні: <i>науковий ступінь, вчене звання, ПІБ, контактні дані</i>
Розміщення курсу	<i><a href="https://ecampus.kpi.ua">https://ecampus.kpi.ua</a></i>

#### Програма навчальної дисципліни

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

Дисципліна необхідна для розширення і поглиблення знань студентів з лекційних курсів, які вивчалися за попередній період навчання, зокрема "Теорія пластичної деформації", "Технологія гарячого об'ємного штампування", "Теорія та процеси заготівельно-штампувального виробництва, «Теорія та процеси гарячого штампування в авіабудуванні», «Холодне об'ємне штампування» та інших. Цей курс викладається студентами першого курсу магістратури.

На процеси пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів впливають три групи параметрів: конструктивні параметри, технологічні параметри і фізико-механічні параметри.

До конструктивних параметрів відносять геометричну форму деформуючого інструменту - пуансонів, матриць та виштовхувачів. Форма інструменту разом з тертям при течії металу на контактуючих поверхнях в процесах пластичного формоутворення суттєво впливає на характер формозміни металу, його напружено-деформований стан, а також на силові режими деформування та величину і розподіл питомих зусиль. Кінцева форма і точність розмірів конструкцій літальних апаратів, механічні властивості zdeформованого металу також визначаються деформуючим інструментом.

До технологічних параметрів відноситься ступінь деформації, який є одним із основних параметрів, що визначають силові режими деформування та кількість переходів при пластичному формоутворенні. Геометрична форма вихідної заготовки суттєво впливає на кількість переходів і силові режими пластичного формоутворення конструкцій. В багатьох таких процесів має місце неусталена течія металу. Наявність неусталеної течії металу та локальний характер осередку деформації в процесах формоутворення конструкцій значно впливають на пластичність металу, що деформується. Швидкість деформування впливає на силові режими пластичного формоутворення. Зусилля деформування дещо зменшується при використанні механічних пресів замість гідравлічних. Для зниження силових режимів пластичного формоутворення використовують примусове зміщення інструменту, що приводить до зменшення зусилля деформування і питомих зусиль на деформуючому інструменті. Також в процесах пластичного формоутворення має місце розвантаження металу за рахунок пружної деформації. Розвантаження впливає на точність розмірів виробів і до теперішнього часу практично не враховувалося при проектуванні технологій. Тип змащення вихідних заготовок залежить від марки матеріалу та схеми операції пластичного формоутворення і суттєво впливає на силові режими формоутворення, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті та його стійкість. При холодному пластичному формоутворенні конструкцій із малопластичних сталей і сплавів використовують дію протитиску на вільну від контакту з інструментом поверхню заготовки. Протитиск приводить до зростання пластичності металу, що деформується. Це дозволяє отримувати високоточні конструкції із інструментальних і штампових сталей. Для процесів гарячого пластичного формоутворення конструкцій головний фактор це температура, від якої залежать силові режими та кількість переходів формоутворення та стійкість деформуючого інструменту.

Фізико-механічні параметри. До вказаних параметрів належать дані про властивості металу вихідної заготовки. Це експериментальна діаграма істинних напружень, яка представляє собою залежність напруження текучості від ступеня деформації. Експериментальна діаграма пластичності (або діаграма руйнування) металу представляє собою залежність накопиченої інтенсивності деформацій зсуву від показника жорсткості схеми напруженого стану. Вона дозволяє визначати по напружено-деформованому стану розрахунковим шляхом ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу та встановлювати можливість руйнування його при пластичному формоутворенні. В теперішній час при моделюванні процесів пластичного формоутворення з використовують пружно-пластичну модель металу.

Конструктивні, технологічні та фізико-механічні параметри обумовлюють схему напруженого стану і гідростатичний тиск в осередку деформації при пластичному формоутворенні конструкцій літальних апаратів. Вони також є визначальними для зусилля деформування, розподілу питомих зусиль на оснащенні та технологічної пластичності металу (пластичність металу при виконанні тієї чи іншої операції пластичного формоутворення). По зусиллях деформування та роботі деформації вибирається ковальсько-пресове обладнання, а величини питомих зусиль дозволяють призначити матеріал для деформуючого інструменту, розрахувати його на міцність та прогнозувати стійкість. Кінцева геометрія конструкцій, зміцнення та ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу разом з пружною деформацією металу визначають якість конструкцій після пластичного формоутворення.

Удосконалення існуючих та розробку нових технологічних процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів з урахуванням вищенаведених факторів в

теперішній час здійснюється в основному з використанням комп'ютерних методів моделювання.

За допомогою створення математичних моделей пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів з використанням таких методів та проведення комп'ютерного моделювання дає можливість провести аналіз впливу великої кількості конструктивних, технологічних та фізико-механічних факторів на формоутворення та дозволяє в короткі терміни встановлювати параметри для проектування технології і необхідні дані для розроблення штампового оснащення. Комп'ютерне моделювання забезпечує проведення оптимізації параметрів та практично виключає виконання виробничих випробувань розроблених технологічних процесів пластичного формоутворення конструкцій.

**Мета дисципліни:** формування систематизованих знань у магістрів по методах комп'ютерного моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів, аналізу впливу конструктивних, технологічних та фізико-механічних факторів на формоутворення та встановленню цими методами раціональних або оптимальних параметрів для проектування технологій пластичного формоутворення та необхідних даних для розроблення штампового оснащення.

Згідно зі стандартом вищої освіти України за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» дисципліна зможе сформувати та розвинути компетентності:

**Загальні компетентності:**

**ЗК2.** Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.

**Спеціальні (фахові, предметні) компетентності:**

**ФК2.** Здатність описати, класифікувати та змодельовати широке коло технічних об'єктів та процесів, що ґрунтується на глибокому знанні та розумінні теорій та практик механічної інженерії, а також знаннях суміжних наук.

**ФК6.** Здатність кваліфіковано проводити вибір класу матеріалів для деталей і виробів авіаційної техніки на підставі знання будови матеріалів та неметалів та методів модифікації їх властивостей.

**Об'єкт дисципліни:** теоретичні методи комп'ютерного моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

**Предмет дисципліни:** створення математичних моделей процесів пластичного формоутворення, виконання моделювання та визначення конструктивних, технологічних та фізико-механічних параметрів для проектування технологічних процесів пластичного формоутворення.

В результаті вивчення дисципліни магістри набувають наступні **знання по:**

- конструктивних, технологічних та фізико-механічних параметрах технологічних процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів;
- сутності методів комп'ютерного моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів, зокрема методу верхньої оцінки, інженерному методу, методу балансу робіт, методу балансу потужностей, варіаційному методу, методу скінченних елементів;
- математичних моделях пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів, які можна розробити на базі вказаних методів;

- способах врахування основних факторів, які впливають при комп'ютерному моделюванні пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів;
  - підходів для визначення можливості руйнування конструкцій при пластичному формоутворенні;
  - способах і підходах підвищення надійності та довговічності конструкцій літальних апаратів при пластичному формоутворенні;
- Також магістри набувають **уміння**:
- уміння обґрунтувати та вибрати метод комп'ютерного моделювання з метою отримання необхідних конструктивних, технологічних та фізико-механічних параметрів для проектування технології пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів;
  - уміння, на основі існуючих схем пластичного формоутворення, скласти розрахункову схему для аналізу вибраним комп'ютерним методом;
  - уміння з великої кількості факторів, які впливають на процес пластичного формоутворення, вибрати основні фактори для врахування при комп'ютерному моделюванні;
  - уміння аналізувати отримані в результаті моделювання конструктивні, технологічні та фізико-механічні параметри, вибрати раціональні чи оптимальні для проектування технології пластичного формоутворення;
  - уміння використовувати сучасні скінченно-елементні програми для виконання комп'ютерного моделювання процесів пластичного формоутворення.

**Лабораторні роботи** направлені на закріплення студентами теоретичних знань та отримання практичних навичок комп'ютерного дослідження процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

**Курсова робота** присвячена виконанню на конкретному прикладі пластичного формоутворення конструкції літального апарату визначення конструктивних, технологічних та фізико-механічних параметрів шляхом використання одного із комп'ютерних методів моделювання.

#### **Програмні результати навчання:**

В результаті вивчення навчальної дисципліни «Комп'ютерні методи моделювання процесів виготовлення конструкцій літальних апаратів» студенти зможуть:

**ПРН1.** Застосовувати спеціалізовані концептуальні знання новітніх методів та методик проектування, аналізу і дослідження конструкцій, машин та/або процесів в галузі машинобудування та суміжних галузях знань.

**ПРН2.** Розробляти і ставити на виробництво нові види продукції, зокрема виконувати дослідно-конструкторські роботи та/або розробляти технологічне забезпечення процесу їх виготовлення.

**ПРН4.** Використовувати сучасні методи оптимізації параметрів технічних систем засобами системного аналізу, математичного та комп'ютерного моделювання, зокрема за умов неповної та суперечливої інформації.

**ПРН16.** Визначати та оптимізувати параметри технологічних процесів, в тому числі з застосуванням автоматизованого комп'ютерного проектування

## **2. Зміст навчальної дисципліни**

### **Вступ.**

**Розділ 1.** Класи задач та комп'ютерні методи моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

1.1. Класи задач.

1.2. Комп'ютерні методи моделювання.

1.3 Оптимізація процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

**Розділ 2.** Напружено-деформований стан металу при пластичному формоутворенні конструкцій літальних апаратів.

2.1. Деформований стан металу.

2.1.1. Способи описування руху частинок металу, що деформується.

2.1.2. Компоненти деформацій в декартових координатах. Компоненти деформацій в циліндричних і сферичних координатах.

2.1.3. Умова постійності об'єму. Схеми деформацій та інтенсивність деформацій. Великі деформації. Швидкість деформації.

2.1.4. Кінематичні граничні умови

2.2. Напружений стан металу

2.2.1. Навантаження на поверхні та в об'ємі деформованого металу. Компоненти напружень в декартових координатах. Компоненти напружень в циліндричних і сферичних координатах. Головні напруження.

2.2.2. Тензори напружень. Інтенсивність напружень. Схеми напружень. Пластичність матеріалу і зусилля деформації.

2.2.3. Статичні граничні умови.

2.2.4. Рівняння зв'язку між напруженнями та деформаціями. Рівняння зв'язку для пружного стану металу. Рівняння зв'язку для пружно-пластичного стану металу. Рівняння зв'язку для жорстко-пластичного стану металу.

**Розділ 3.** Граничні стани металу при пластичному формоутворенні конструкцій літальних апаратів

3.1. Загальні відомості про граничні стани.

3.2. Перший граничний стан.

3.2.1. Умова пластичності Треска-Сен-Венана. Умова пластичності Губера-Мізеса. Умови пластичності для різних задач.

3.2.2. Умови пластичності і зміцнення. Діаграми істинних напружень.

3.3. Другий граничний стан.

3.3.1. Деформуємість, діаграми пластичності та їх апроксимація.

3.3.2. Ступінь використання ресурсу пластичності та послідовність його визначення.

**Розділ 4.** Комп'ютерні методи моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

4.1. Метод спільного вирішення диференційних рівнянь рівноваги з умовою пластичності.

4.1.1. Диференційні рівняння рівноваги і руху в декартових координатах. Диференційні рівняння рівноваги для вісесиметричної задачі і в сферичних координатах.

4.1.2. Теоретичні основи методу для різних задач пластичного формоутворення.

4.2. Інженерний метод.

4.2.1. Теоретичні основи методу.

4.2.2. Алгоритм вирішення задач пластичного формоутворення інженерним методом.

- 4.2.3. Аналіз закритого зворотного видавлювання інженерним методом.
- 4.3. Метод балансу робіт.
  - 4.3.1. Теоретичні основи методу.
  - 4.3.2. Алгоритм вирішення задач обробки металів тиском методом балансу робіт.
  - 4.3.4. Аналіз осаджування трубчастої заготовки методом балансу робіт.
- 4.4. Метод балансу потужностей.
  - 4.4.1. Теоретичні основи методу.
  - 4.4.2. Алгоритм вирішення задач обробки металів тиском методом балансу потужностей.
  - 4.4.3. Вирішення задачі зворотного видавлювання методом балансу потужностей.
- 4.5. Метод верхньої оцінки.
  - 4.5.1. Теоретичні основи методу.
  - 4.5.2. Алгоритм вирішення задач обробки металів тиском методом верхньої оцінки.
- 4.6. Варіаційний метод.
  - 4.6.1. Теоретичні основи методу.
  - 4.6.2. Алгоритм вирішення задачі варіаційним методом.
  - 4.6.3. Аналіз осаджування прямокутної заготовки варіаційним методом.
- 4.7. Метод скінченних елементів.
  - 4.7.1. Загальні відомості про метод.
  - 4.7.2. Скінченні елементи.
  - 4.7.3. Компоненти переміщень і швидкостей для плоских задач в декартових координатах.
  - 4.7.4. Компоненти переміщень і швидкостей в циліндричних координатах.
  - 4.7.5. Компоненти деформацій для плоских задач.
  - 4.7.6. Компоненти напружень для плоских задач.
  - 4.7.7. Компоненти напружень для вісесиметричних задач.
  - 4.7.8. Основне рівняння методу скінченних елементів.
  - 4.7.9. Рівняння методу в приполюваннях і умова рівноваги.
  - 4.7.10. Підходи для аналізу фізично-нелінійних задач пластичного формоутворення в методі скінченних елементів.
  - 4.7.11. Підхід для вирішення способом дотичних жорсткостей (змінних параметрів пружності).
  - 4.7.12. Підхід для вирішення способом початкових напружень. Алгоритм способу початкових напружень і критерії збіжності.
  - 4.7.13. Пружно-пластичний перехід при формоутворенні.
  - 4.7.14. Методика визначення кінцевих приполювань напружень в процесі пружно-пластичного формоутворення.
  - 4.7.15. Методика підрахунку приполювань деформацій і напружень від рівноважних значень величин.
  - 4.7.16. Алгоритм моделювання пластичного формоутворення методом скінченних елементів. Врахування кінематичних і статичних граничних умов.
  - 4.7.18. Аналіз задачі зворотного видавлювання з протитиском для вирішення методом скінченних елементів.
  - 4.7.19. Скінченно-елементні програми для аналізу процесів пластичного формоутворення.

### 3. Навчальні матеріали та ресурси

#### Основна література.

1. Калюжний В.Л. Комп'ютерні методи моделювання процесів виготовлення конструкцій літальних апаратів. Конспект лекцій / В. Л. Калюжний // – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 176 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48925>
2. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. - Харків: "Вища школа", 1981. - 248 с.
3. Теория пластических деформаций металлов. / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; под ред. Е.П. Унксова. - М.: "Машиностроение", 1983. - 598 с.
4. Калюжний В.Л. Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів механіко-машинобудівного інституту/ Уклад.: В.Л. Калюжний, О.В. Калюжний. – К. :Гама-Принт, 2010. – 80 с.
5. Калюжний В.Л. Методичні вказівки до вирішення задач підвищеної складності з дисципліни «Чисельні методи аналізу процесів обробки металів тиском» з напряму підготовки 6.050502 – «Інженерна механіка», спеціальності – 7(8).05050203 «Обладнання і технології пластичного формування конструкцій машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ»; уклад. В. Л. Калюжний. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,83 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 187 с. Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/6451>

#### Додаткова література

1. Калюжний В.Л., Калюжний О.В. Інтенсифікація листового штампування. Формоутворюючі процеси / В.Л. Калюжний, О.В. Калюжний // Київ: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка». 2016. 300 с.
2. Калюжний О.В., Калюжний В.Л. Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування / О.В. Калюжний, В.Л. Калюжний. – К: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. 292 с.
3. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин І.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки: Учебник для вузов / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. 400 с.
4. Е.М.Морозов, Г.П. Никишков. Метод конечных элементов в механике разрушения. - М.: "Наука", 1980. - 256 с

### Навчальний контент

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

##### Лекція 1.

**Розділ 1.** Класи задач та комп'ютерні методи моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

1.3. Класи задач.

1.4. Комп'ютерні методи моделювання.

1.3 Оптимізація процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

##### Лекція 2.

**Розділ 2.** Напружено-деформований стан металу при пластичному формоутворенні конструкцій літальних апаратів.

4.1. Деформований стан металу.

4.1.1. Способи описування руху частинок металу, що деформується.

- 4.1.2. Компоненти деформацій в декартових координатах. Компоненти деформацій в циліндричних і сферичних координатах.
- 4.1.3. Умова постійності об'єму. Схеми деформацій та інтенсивність деформацій. Великі деформації. Швидкість деформації.
- 4.1.4. Кінематичні граничні умови

#### **Лекція 4.**

- 4.2. Напружений стан металу
  - 4.2.1. Навантаження на поверхні та в об'ємі деформованого металу. Компоненти напружень в декартових координатах. Компоненти напружень в циліндричних і сферичних координатах. Головні напруження.
  - 4.2.2. Тензори напружень. Інтенсивність напружень. Схеми напружень. Пластичність матеріалу і зусилля деформації.
  - 4.2.3. Статичні граничні умови.
  - 4.2.4. Рівняння зв'язку між напруженнями та деформаціями. Рівняння зв'язку для пружного стану металу. Рівняння зв'язку для пружно-пластичного стану металу. Рівняння зв'язку для жорстко-пластичного стану металу.

#### **Лекція 5.**

### **Розділ 3.** Граничні стани металу при пластичному формоутворенні конструкцій літальних апаратів

- 3.1. Загальні відомості про граничні стани.
- 3.2. Перший граничний стан.
  - 3.2.1. Умова пластичності Треска-Сен-Венана. Умова пластичності Губера-Мізеса. Умови пластичності для різних задач.
  - 3.2.2. Умови пластичності і зміцнення. Діаграми істинних напружень.
- 3.3. Другий граничний стан.
  - 3.3.1. Деформуємість, діаграми пластичності та їх апроксимація.
  - 3.3.2. Ступінь використання ресурсу пластичності та послідовність його визначення.

#### **Лекція 6.**

### **Розділ 4.** Комп'ютерні методи моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів.

- 4.1. Метод спільного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги з умовою пластичності.
  - 4.1.1. Диференціальні рівняння рівноваги і руху в декартових координатах. Диференціальні рівняння рівноваги для вісесиметричної задачі і в сферичних координатах.
  - 4.1.2. Теоретичні основи методу для різних задач пластичного формоутворення.

#### **Лекція 7.**

- 4.2. Інженерний метод.
  - 4.2.1. Теоретичні основи методу.
  - 4.2.2. Алгоритм вирішення задач пластичного формоутворення інженерним методом.
  - 4.2.3. Аналіз закритого зворотного видавлювання інженерним методом.

#### **Лекція 8.**

- 4.3. Метод балансу робіт.
  - 4.3.1. Теоретичні основи методу.
  - 4.3.2. Алгоритм вирішення задач обробки металів тиском методом балансу робіт.
  - 4.3.4. Аналіз осаджування трубною заготовки методом балансу робіт.

#### **Лекція 9.**



#### 4.4. Метод балансу потужностей.

4.4.1. Теоретичні основи методу.

4.4.2. Алгоритм вирішення задач обробки металів тиском методом балансу потужностей.

4.4.3. Вирішення задачі зворотного видавлювання методом балансу потужностей.

#### **Лекція 10.**

#### 4.5. Метод верхньої оцінки.

4.5.1. Теоретичні основи методу.

4.5.2. Алгоритм вирішення задач обробки металів тиском методом верхньої оцінки.

4.5.3. Аналіз зворотного видавлювання з роздачою методом верхньої оцінки

#### **Лекція 11.**

#### 4.6. Варіаційний метод.

4.6.1. Теоретичні основи методу.

4.6.2. Алгоритм вирішення задачі варіаційним методом.

4.6.3. Аналіз осаджування прямокутної заготовки варіаційним методом.

#### **Лекція 12.**

#### 4.7. Метод скінченних елементів.

4.7.1. Загальні відомості про метод.

4.7.2. Скінченні елементи.

#### **Лекція 13.**

4.7.3. Компоненти переміщень і швидкостей для плоских задач в декартових координатах.

4.7.4. Компоненти переміщень і швидкостей в циліндричних координатах.

4.7.5. Компоненти деформацій для плоских задач.

#### **Лекція 14.**

4.7.6. Компоненти напружень для плоских задач.

4.7.7. Компоненти напружень для вісесиметричних задач.

#### **Лекція 15.**

4.7.8. Основне рівняння методу скінченних елементів.

4.7.9. Рівняння методу в приполюваннях і умова рівноваги.

#### **Лекція 16.**

4.7.10. Підходи для аналізу фізично-нелінійних задач пластичного формоутворення в методі скінченних елементів.

4.7.11. Підхід для вирішення способом дотичних жорсткостей (змінних параметрів пружності).

4.7.12. Підхід для вирішення способом початкових напружень. Алгоритм способу початкових напружень і критерії збіжності.

4.7.13. Пружно-пластичний перехід при формоутворенні.

#### **Лекція 17.**

4.7.14. Методика визначення кінцевих приполювань напружень в процесі пружно-пластичного формоутворення.

4.7.15. Методика підрахунку приполювань деформацій і напружень від рівноважних значень величин.

4.7.16. Алгоритм моделювання пластичного формоутворення методом скінченних елементів. Врахування кінематичних і статичних граничних умов.

#### **Лекція 18.**

4.7.18. Аналіз задачі зворотного видавлювання з протитиском для вирішення методом скінченних елементів.

4.7.19. Скінченно-елементні програми для аналізу процесів пластичного формоутворення.

#### **Модульна контрольна робота.**

Для поточного контролю якості засвоєння матеріалу рекомендується проведення модульної контрольної роботи, яка складається з двох частин (МКР). Перша частина проводиться для перевірки засвоєння матеріалу 1-3 розділів, друга – для перевірки засвоєння матеріалу 4 розділу.

Завдання, які виносяться на першу частину МКР: теоретичні відомості про аналітичні методи, основні рівняння методів, алгоритми аналізу задач пластичного формоутворення вказаними методами, складання розрахункових схем, кінематичні та статичні граничні умови для різних процесів обробки металів тиском, врахування зміцнення при теоретичному аналізі.

Завдання, які виносяться на другу частину МКР: складання розрахункової схеми для моделювання процесів пластичного формоутворення методом скінченних елементів, опис та врахування кінематичних та статичних граничних умов і механічних властивостей металу. Способи врахування статичних і кінематичних умов в методі скінченних елементів.

#### **Лабораторні роботи.**

Перелік лабораторних робіт наведений в таблиці 1.

Таблиця 1

№ з/п	Назва лабораторної роботи (комп'ютерного практикуму)
1	2
1	<b>Лабораторна робота №1. "Метод верхньої оцінки".</b> Кожному студенту видається завдання (схема процесу пластичного формоутворення та розміри здеформованої заготовки). Вказаним методом необхідно вирішити задачу, отримати аналітичні залежності для розрахунку зусилля деформування та питомого зусилля. Для конкретних розмірів заготовки визначити величину зусилля деформування і питомих зусиль на деформуючому інструменті. Провести аналіз отриманих результатів теоретичних досліджень та зробити висновки по роботі.
2	<b>Лабораторна робота № 2. "Інженерний метод".</b> Кожному студенту видається завдання (схема процесу пластичного формоутворення з геометричними розмірами здеформованої заготовки). Вказаним методом вирішити задачу для одержання формул, які визначають питомих зусиль і загальне зусилля деформування. Для конкретних геометричних розмірів заготовки визначити зусилля і побудувати графік питомих зусиль на деформуючому інструменті. Провести аналіз отриманих результатів теоретичних досліджень та зробити висновки по роботі
3	<b>Лабораторна робота №3. "Метод балансу потужностей".</b> Кожному студенту видається завдання (схема процесу пластичного формоутворення з геометричними розмірами здеформованої заготовки).

	<p>Вказаним методом необхідно вирішити задачу і одержати формули для визначення зусилля і питомого зусилля процесу деформування. Для конкретних розмірів заготовки визначити зусилля і питоме зусилля.</p> <p>Провести аналіз отриманих результатів теоретичних досліджень та зробити висновки по роботі.</p>
4	<p><b><i>Лабораторна робота № 4. "Метод скінченних елементів".</i></b></p> <p>Кожному студенту видається завдання (схема процесу пластичного формоутворення з геометричними розмірами).</p> <p>Необхідно підготувати вихідні дані і поставити задачу для математичного моделювання методом скінчених елементів з урахуванням статичних і кінематичних умов деформованого матеріалу. Підготувати вихідні дані по властивостях металу заготовки. Робота закінчується підготовкою даних вихідних даних для моделювання процесів обробки металів тиском на комп'ютері.</p> <p>Провести аналіз отриманих результатів теоретичних досліджень та зробити висновки по роботі.</p>

#### ***Курсова робота.***

Для закріплення отриманих знань по комп'ютерним методам моделювання процесів пластичного формоутворення конструкцій літальних апаратів з визначення параметрів для проектування технологій студентами виконується курсова робота.

Мета курсових робіт – визначення параметрів для розробки технологій виготовлення конструкцій пластичним формоутворенням на основі комп'ютерного моделювання.

Курсові роботи по дисципліні виконуються студентами на тему "Математичне моделювання процесів пластичного формоутворення методом скінченних елементів". Кожному студенту видається завдання в вигляді схеми процесу холодного об'ємного, холодного листового та гарячого об'ємного формоутворення з відповідним геометричним розмірами заготовки та деформуючого інструменту.

Зміст курсової роботи полягає в тому, що студенти на основі підготовлених вихідних даних при виконанні 4 лабораторної роботи, виконують математичне моделювання процесів пластичного формоутворення на комп'ютері. По отриманим результатах розрахунків студенти проводять аналіз напружено-деформованого стану металу і визначають раціональні або оптимальні параметри для проектування технології: зусилля, питомі зусилля на деформуючому інструменті, ступінь використання ресурсу пластичності, зміцнення здеформованого металу.

Для прикладу, нижче наведені теми курсових робіт по холодному об'ємному формоутворенню:

1. Моделювання виготовлення круглих ступінчатих стержнів.
2. Моделювання виготовлення фасонних ступінчатих стержнів.
3. Моделювання виготовлення круглих стержнів з фланцями.
4. Моделювання виготовлення фасонних стержнів з фланцями
5. Моделювання виготовлення заготовок болтів.
6. Моделювання виготовлення трубчатих деталей.
7. Моделювання виготовлених клепок в штампах.
8. Моделювання виготовлення круглих порожнистих виробів.
9. Моделювання виготовлення круглих порожнистих виробів з виступом на донній частині

зі сторони порожнини.

10. Моделювання виготовлення круглих порожнистих виробів зі стінкою змінної товщини по висоті.

11. Моделювання виготовлення круглих порожнистих виробів з фланцем на донній частині.

12. Моделювання виготовлення круглих порожнистих виробів витягуванням з потоншенням.

13. Моделювання виготовлення круглих порожнистих виробів шляхом обтиску.

14. Моделювання виготовлення коробчастих порожнистих виробів зі стінкою постійної товщини по периметру.

15. Моделювання виготовлення коробчастих порожнистих виробів зі стінкою змінної товщини по периметру.

16. Моделювання процесу виготовлення шестигранних гайок.

## 5. Самостійна робота студента

### *Завдання на самостійну роботу.*

Завдання на самостійну роботу приведені таблиці 2.

Таблиця 2.

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання
1	Розділ 1. Експериментальні методи аналізу процесів ОМТ
2	Розділ 1. Визначення компонент малих зсувних деформацій.
3	Розділ 1. Визначення компонент деформацій з умови постійності об'єму.
4	Розділ 1. Плоско-деформований стан і плоско-напружений стани.
5	Розділ 1. Статичні і кінематичні граничні умови.
6	Розділ 1. Рівняння зв'язку між напруженнями та деформаціями в сферичних координатах
7	Розділ 2. Умови пластичності для різних задач.
8	Розділ 2. Експериментальні діаграми істинних напружень та діаграми пластичності.
9	Розділ 3. Диференційні рівняння рівноваги в декартових координатах для плоского напруженого та плоско деформованого стану.
10	Розділ 3. Диференційні рівняння рівноваги в циліндричних координатах для плоского напруженого та плоско деформованого стану.
11	Розділ 3. Розподіл дотичних напружень в заготовці, що деформується.
12	Розділ 3. Розподіл компонент переміщень і швидкостей частинок металу в різних процесах пластичного формоутворення.
13	Розділ 3. Визначення зусилля деформування в декартових і циліндричних координатах заготовок різних розмірів.
14	Розділ 3. Побудова плану швидкостей зміщення жорстких об'ємів в процесах ОМТ для методу верхньої оцінки.

15	Розділ 3. Використання теоретичних методів для аналізу операцій листового штампування
17	Розділ 4. Врахування статичних і кінематичних граничних умов в методі скінченних елементів
18	Розділ 4. Врахування статичних і кінематичних граничних умов в методі скінченних елементів

## Політика та контроль

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

Відвідування занять студентами є обов'язковим компонентом оцінювання, за яке нараховуються бали. За об'єктивних причин (наприклад, хвороба, міжнародне стажування) навчання може відбуватись в on-line формі за погодженням із керівником курсу. Відвідування лекційних занять без пропусків (крім поважних причин) додатково оцінюється 10 балів, якщо кількість пропусків не перевищує 15% лекцій нараховується 8 балів, при кількості пропусків більше 15% - 0 балів. За активність студентів на лекціях ще нараховуються: активність на всіх лекціях - 5 балів. За кожен підготовку коротких доповідей згідно з розділами лекцій та виступом на лекції нараховується 5 балів. При цьому текст доповіді перевіряється на наявність плагіату із коректними запозиченнями до 20 %.

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

Після вивчення дисципліни передбачено проведення екзамену, а також отримання оцінки при виконанні курсової роботи.

#### Рейтингова система оцінювання результатів навчання

Розроблення рейтингової системи оцінювання(PCO) з дисципліни є складовою частиною робочої навчальної програми. Семестровий контроль заплановано у вигляді екзамену, то 100-бальна шкала оцінювання поділяється на дві складові.

Перша складова (60 балів) містить бали, які отримані студентом при виконанні лабораторних робіт (24 бали), курсової роботи (46 балів), що є стартовою складовою для допуску студента до екзамену.

Друга складова 48 балів (екзаменаційна шкала) призначена для оцінювання результатів навчання на екзамені. Якщо студент набрав більше 80 балів (з урахуванням п.7), то він може отримати позитивну оцінку без здачі екзамену..

#### *Лабораторні роботи.*

Ваговий бал кожної роботи – 6. Максимальна кількість балів за всі лабораторні роботи дорівнює  $6 \times 4 = 24$  бали.

*Критерії оцінювання лабораторних робіт:*

- підготовка до лабораторної роботи – 1 бал (знання мети і методики проведення роботи та підготовка протоколу – 1 бал; відсутність необхідних знань або протоколу – 0 балів);
- виконання лабораторної роботи - 2 бали ( активна участь – 2 бали, пасивна – 1 бал, неучасть – 0 балів);
- оформлення протоколу роботи - 1 бал;
- захист лабораторної роботи - 2 бали ( знання теоретичних основ роботи, методики теоретичних досліджень та висновків – 2 бали; неповні або неточні відповіді на запитання – 1 бал; відсутність знань – 0 балів).

Лабораторна робота вважається зарахованою, якщо число набраних балів складає не менше 4.

### ***Курсова робота.***

Ваговий бал курсової роботи (КР) – 46 балів. КР поділяється на 5 етапів:

*Критерії оцінювання РГР:*

1) підготовка даних для розрахунків – 5 балів (правильне та своєчасне складання вихідних даних – 5 балів; складання вихідних даних з незначними помилками – 3 бали; несвоєчасне складання вихідних даних зі значними помилками – 1 бал; відсутність вихідних даних - 0 балів );

2) проведення розрахунків – 16 балів (знання методики проведення розрахунків – 5 балів; нечітке знання методики проведення розрахунків – 3 бали; своєчасно проведені розрахунки в повному обсязі – 5 балів; несвоєчасно проведені розрахунки зі значними помилками – 3 бали; відсутність відповідних знань та розрахунків – 0 балів).

3) обробка результатів розрахунків – 5 балів (своєчасне та правильне виконання розрахунків – 5 балів; виконання розрахунків з незначними помилками – 3 бали; несвоєчасне виконання розрахунків зі значними помилками – 1 бал; відсутність результатів розрахунків – 0 балів)

4) оформлення пояснювальної записки – 10 балів (пояснювальна записка оформлена своєчасно, охайно, в повному обсязі, без помилок, згідно вимог до пояснювальних записок – 10 балів; пояснювальна записка оформлена з незначними помилками – 7 балів; неохайне оформлення не в зазначений термін зі значними помилками – 3 бали; відсутність пояснювальної записки – 0 балів)

5) захист роботи – 10 балів (знання та вміння відповідати на запитання – 10 балів; задовільне знання теоретичної частини та відповіді з помилками – 5 балів; незадовільне знання теоретичної частини, відсутність відповідей на запитання – 0 балів)

На екзамені студенти виконують письмову роботу. Кожне завдання містить два запитання по розділах дисципліни і одне практичне питання по формулюванню або встановленню вихідних даних для проведення комп'ютерного моделювання процесу пластичного формоутворення. Перші два питання (завдання) оцінюються по 15 балів, третє 18 балів за такими критеріями:

- «відмінно», повна відповідь, не менше 90% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – по 15-14 балів за перші два питання та 18-17 балів за третє питання;
- «дуже добре», практично повна відповідь, не менше 85% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або є незначні неточності у відповідях – по 14-13 балів за перші два питання та 17-16 балів за третє питання;
- «добре», достатньо повна відповідь, не менше 75% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або є незначні неточності у відповідях – по 13-12 балів за перші два питання та 16-15 балів за третє питання;
- «задовільно», неповна відповідь, не менше 65% потрібної інформації та наявність великої кількості несуттєвих помилок – по 12-10 балів за перші два питання та 14-12 балів за третє питання;
- «достатньо», неповна відповідь, не менше 55% потрібної інформації та наявність великої кількості суттєвих помилок – по 9-7 балів за перші два питання та 11-9 балів за третє питання;
- «незадовільно», відповідь не відповідає умовам до «достатньо» – 0 балів.

Сума стартових балів та балів за екзаменаційну роботу переводиться до екзаменаційної оцінки згідно з таблицею:

Бали	Оцінка
100...95	Відмінно
94...85	Дуже добре
84...75	Добре
74...65	Задовільно
64...60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Є не зараховані лабораторні роботи або не зарахована розрахункова робота	Не допущено

**Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено** професором, д.т.н. Калюжним Володимиром.

**Ухвалено** кафедрою технології виробництва літальних апаратів (протокол № 16 від 06.07.2022 р.)

**Погоджено** Методичною комісією механіко-машинобудівного інституту (протокол № 11 від 29.08.2022 р.)