

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Григорій СТРИЛЕЦЬ

« 28 » Серпня 2026

ПОГОДЖЕНО

Заступник директора НДН ЗПО «ДПТК»

Григорій ГОРДІЄНКО



МЕТОДИЧНІ РОЗРОБКИ ПЛАНУ СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ

НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ІСТОРІЯ ТА КУЛЬТУРА УКРАЇНИ»

Спеціальність: G9 Прикладна механіка

ТЕМА 1: Аналіз інженерних рішень під час зведення монументальних споруд стародавнього світу (основи статики та кінематики простих механізмів)

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-кінематичного аналізу, вивчення інженерних першоджерел та кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

- Дидактична:** Здійснити глибинний аналіз витоків прикладної механіки на прикладі зведення монументальних оборонних та цивільних споруд в античних полісах Північного Причорномор'я (Ольвії, Херсонесі, Пантікапеї). Розкрити принципи дії простих механізмів (важелів, клинів, блоків, поліспаств) як перших інженерних засобів подолання гравітації та оптимізації фізичної праці в умовах доіндустріального суспільства.
- Методологічна:** Сформувати у майбутніх фахівців зі спеціальності «Прикладна механіка» навички ретроспективного аналізу складних технологічних операцій. Навчити аналізувати логіку стародавніх вантажопідйомних машин, розуміючи емпіричне походження «золотого правила механіки» (виграш у силі дорівнює програшу у відстані) без застосування сучасного математичного апарату, спираючись на історичний контекст.
- Соціально-адаптивна:** Використати історичний досвід античних інженерів для демонстрації тріумфу людського інтелекту над обмеженими ресурсами. У рамках trauma-informed підходу (педагогіки, обізнаної з травмою), провести паралель між стійкістю стародавніх зодчих, які зводили мегаструктури базовими інструментами, та внутрішньою резильєнтністю (життестійкістю) сучасного фахівця, який здатен розв'язувати надскладні задачі повоєнної відбудови попри стрес і дефіцит.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

- Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Емпірична механіка як фундамент для розуміння еволюції машинобудування. Механізм як розширювач біологічних можливостей людини.
- Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія античних полісів України. Аналіз історичної логіки застосування простих механізмів (важіль, похила площина, блок) у монументальному будівництві.
- Дослідницький блок (20 хв):** Робота з першоджерелами. Аналіз трактатів античних інженерів (Вітрувія та Герона Александрійського) щодо конструювання поліспаств і законів рівноваги.
- Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерно-логістичних задач в умовах будівництва античного поліса. Обґрунтування механічної переваги.
- Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ

Слово викладача: «Уявіть собі будівельний майданчик Херсонеса або Пантікапея понад дві тисячі років тому. Перед стародавнім інженером стоїть завдання: підняти мармурову колону або кам'яний квадрат вагою в 5 тонн на висоту 10 метрів. У нього немає ані дизельного двигуна, ані гідравлічного крана. Але у нього є фундаментальне емпіричне розуміння природи речей. Зародження механіки як практичної науки почалося саме тут — із прагнення оптимізувати зусилля людських м'язів. Застосовувавши важіль, античний зодчий навчився переносити точку опори. Застосовувавши похилу площину і дерев'яні котки, він замінив руйнівне тертя ковзання на більш ефективне тертя кочення. А винайшовши поліспаст (систему рухомих і нерухомих блоків), він навчився акумулювати і спрямовувати силу десятка робітників, перетворюючи її на колосальний вантажопідйомний ефект. Сьогодні ми розберемо ці прості механізми, занурившись у логіку стародавніх майстрів, які зводили вічні споруди без жодної математичної формули».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз простих механізмів античності

Тип механізму	Історична та інженерна сутність	Застосування в монументальному будівництві
Похила площина (Пандус)	Механізм, що дозволяє піднімати вантаж, прикладаючи зусилля, значно менше за його вагу. Античні зодчі емпірично встановили: чим довшим і пологішим є земляний пандус, тим легше перемістити кам'яний блок, що компенсується пропорційним збільшенням пройденого шляху.	Зведення масивних оборонних мурів (панцирна кладка). Доставка мегалітів на акрополь по насипних рампах за допомогою котків та тягової сили волів.
Важіль (першого роду)	Тверде тіло, що обертається навколо нерухокої опори. Рівновага та вигравш у силі досягаються за рахунок різниці довжини плечей: прикладання зусилля одного робітника до довгого плеча дозволяє зрушити колосальну вагу на короткому.	Ювелірне позиціонування багатотонних кам'яних блоків у сухій кладці за допомогою масивних залізних або бронзових ломів (через спеціальні монтажні гнізда у камені).
Поліспаст (Блокова система)	Система, складена з рухомих і нерухомих дерев'яних або бронзових шківів, огинутих міцним прядив'яним канатом. Механізм дає кратний вигравш у силі, розподіляючи вагу вантажу між кількома паралельними гілками каната.	Робочий орган античних дерев'яних підйомних кранів (триспастосів, пентаспастосів) для вертикального підйому архітравів, колон та дахових перекриттів храмів.
Клин	Різновид двосторонньої похилої площини, що трансформує поздовжнє ударне зусилля ковадла чи молота у колосальний бічний тиск, здатний розривати найщільніші матеріали.	Видобуток вапняку в причорноморських каменоломнях. Сухі дерев'яні клини забивали в отвори у скелі і поливали водою; розбухаючи, дерево розколювало кам'яний моноліт.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте уривки з античних інженерних трактатів, які описують емпіричні принципи дії підйомних механізмів, та дайте відповіді на фахові питання в історичному контексті.

Документ 1: Марк Вітрувій Полліон, «Десять книг про архітектуру» (Книга X, розділ II)
«...Якщо вантажі будуть занадто великі і важкі, то не слід довіряти коловороту, але необхідно зробити так, щоб вісь оберталася за допомогою ступального колеса. На верхньому блоці влаштовуються три шківів, а на нижньому — два. Канат пропускається так, щоб він ішов від верхнього блоку до нижнього, і так проводиться через усі шківів, поки не дійде до вала. Коли люди почнуть ходити всередині колеса, воно обертатиме вал, канат намотуватиметься, і вантаж буде піднято на потрібну висоту з легкістю».

Документ 2: Герон Александрійський, «Механіка» (Трактат про підняття тягарів)

«Слід знати, що сили, які рухають тягарі за допомогою машин, мають до тягарів таке саме відношення, як відстані, пройдені силами, до відстаней, пройдених тягарями. Отже, якщо ми використовуємо систему з п'яти шківів, сила, яку ми маємо прикласти, становитиме одну п'яту частину від ваги тягаря, але каната ми витягнемо у п'ять разів більше, ніж висота підйому».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

1. **Кінематичний аспект:** Вітрувій описує використання «ступального колеса» замість ручного коловорота. Як з точки зору античної логіки важеля збільшення радіуса приводного колеса (всередині якого йдуть люди) відносно малого радіуса вала (де намотується канат) допомагало долати вагу вантажу?
2. **Закон збереження праці:** Герон Александрійський формулює правило: виграш у силі в 5 разів вимагає витягування каната у 5 разів більшої довжини. Поясніть це явище з точки зору античної інженерної логіки просторового переміщення. Чому стародавні майстри розуміли, що неможливо створити механізм, який дасть виграш і в тяговому зусиллі, і у швидкості одночасно?
3. **Матеріалознавчий аспект:** Античні канати виготовлялися з прядива, скрученого льону або тваринних жил, які мали природну межу міцності на розрив. Як використання саме п'яти шківів (поліспасти), окрім зменшення тягового зусилля людей, фізично рятувало самі канати від розриву під час підйому багатотонної мармурової колони?

Еталон відповіді викладача:

1. Збільшення радіуса ступального колеса діє за принципом безперервного важеля. При тій самій тяговій силі (яку створювала вага тіл робітників, що крокували всередині обода), значно більший радіус колеса створював потужний обертальний ефект на центральній осі намотування. Це дозволяло меншій кількості людей піднімати непропорційно більшу вагу.
2. Це класичний прояв того, що згодом назвуть «золотим правилом механіки». Античні інженери емпірично усвідомили закон компенсації: механізми не створюють енергію з нічого, вони лише перерозподіляють зусилля. Знижуючи тягове навантаження на робітників у 5 разів, поліспасти неминуче змушує їх пройти у 5 разів більшу відстань, витягуючи нескінченні метри каната, щоб підняти вантаж на задану висоту.
3. У системі з п'яти рухомих гілок (поліспасти) загальна вага вантажу рівномірно розподіляється між усіма натягнутими мотузками. Тобто натяг у кожному окремому сегменті каната становить лише п'яту частину від загальної маси каменю. Це геніальне рішення проблеми обмеженої міцності доіндустріальних матеріалів, яке дозволяло піднімати вантажі, що інакше розірвали б будь-який одинарний трос.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Логістична криза: Переміщення мегаліта в Ольвії)

Ситуація: Ви — головний інженер будівництва античного храму. Вам потрібно доставити з віддаленої каменоломні до підніжжя фундаменту монолітний кам'яний блок надзвичайної ваги. Дорога являє собою твердий, але нерівний ґрунтовий шлях з легким підйомом. Спроба тягнути блок просто по землі на дерев'яних санях (волокушах) провалилася: опір поверхні настільки високий, що навіть сотня тяглових биків не може зрушити його з місця; шкіряні упряжі починають рватися від напруги.

Завдання: Спираючись на досвід стародавніх механіків, запропонуйте інженерне рішення, яке дозволить радикально зменшити силу опору і доставити блок, використовуючи наявні природні матеріали (обтесане дерево, тваринний жир, мотузки).

Очікуване рішення: Головний ворог античного будівельника — тертя ковзання масивного об'єкта об ґрунт. Інженер має здійснити перехід до принципу кочення. Рішення: укладання на дорогу паралельних дерев'яних напрямних (своєрідних рейок), на які кладуться ідеально обтесані круглі дерев'яні котки (циліндри з твердих порід дерева). Кам'яний блок ставиться на котки. Опір при перекочуванні круглого тіла в десятки разів менший за опір плоского ковзання. Для додаткової оптимізації напрямні щедро змащуються тваринним жиром, що полегшує рух котків. У міру просування блоку задні котки вручну переносяться наперед. Це історичний прототип сучасних роликів підшипників та конвеєрних ліній.

Кейс 2 (Просторова нестабільність: Монтаж архітрава у Херсонесі)

Ситуація: Під час монтажу масивної кам'яної балки перекриття (архітрава) на високу колонаду храму, ви використовуєте дерев'яний кран-триспастос. Вантаж завис високо в повітрі. Раптом починається сильний поривчастий вітер зі сторони моря. Балка починає неконтрольовано розгойдуватися, створюючи колосальні бічні навантаження на стрілу крана. З'являється тріск у головній дерев'яній щоглі — кран на межі перекидання і фатального руйнування.

Завдання: Ваші дії як античного майстра-механіка для негайної стабілізації системи та запобігання катастрофі без скидання дорогоцінного вантажу.

Очікуване рішення: Проблема полягає у виникненні маятникових коливань важкого тіла, що створює руйнівний бічний тиск, на який вертикальна дерев'яна щогла крана не розрахована. Екстрене інженерне рішення: створення системи розтяжок-демпферів. Робітники негайно накидають на обидва кінці розгойданої балки додаткові довгі канати (відтяжки) і розходяться в протилежні сторони на землі, силою натягуючи їх. Ці відтяжки створюють жорсткий просторовий трикутник сил, що фізично блокує розгойдування архітрава в горизонтальній площині. Маятниковий рух припиняється, бічний тиск на щоглу знімається, після чого здійснюється повільний і безпечний спуск або позиціонування вантажу на капітелі колон.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історичної перспективи терміни: *поліспа́ст, ступа́льне ко́лесо, ва́жіль, тертя ковза́ння, тертя коче́ння, ісоно́мія.*
- Описати у вигляді таблиці ключові функціональні відмінності між використанням клина в каменоломні та похилої площини при зведенні стін.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Стародавні будівельники часто не мали можливості підняти колону цілком, тому складали її з окремих циліндричних барабанів (сегментів). Щоб ці барабани не зсунулися відносно один одного під час землетрусів, використовувалися приховані інженерні кріплення (пірони та емполії).

- **Завдання:** Знайдіть історичну інформацію про конструкцію античних металевих піронів, які заливалися свинцем у центрі мармурових колон. Коротко (0,5 сторінки) проаналізуйте цю технологію. Яку захисну функцію під час горизонтальних зрушень виконував свинцево-бронзовий вузол, і як м'який свинець діяв як природний амортизатор при сейсмічних вібраціях?

3. Творче завдання (Есе):

Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від античного поліспа́ста до сучасних механізмів: еволюція розуміння передачі зусиль в інженерній справі».
2. «Інженер як переможець гравітації: моральна та технічна відповідальність античного зодчого при зведенні монументальних споруд».
3. «Від ковзання до кочення: як прості дерев'яні котки заклали історичний фундамент для розвитку транспортної механіки».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Розуміння історичного контексту та коректне оперування базовими поняттями емпіричної механіки під час аналізу античних об'єктів — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна обґрунтованість під час розв'язання фахових логістичних та кінематичних кейсів минулого — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати античний інженерний досвід на загальну еволюцію механіки у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 2: Дослідження еволюції упряжі, тяглової сили та транспортних засобів ранніх слов'ян

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історичного біомеханічного аналізу, вивчення еволюції аграрних технологій та інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

- Дидактична:** Проаналізувати першу "енергетичну революцію" в історії на прикладі господарства ранніх слов'ян — перехід від мускульної сили людини до використання тяглової сили тварин. Дослідити еволюцію проміжних механізмів (упряжі), що забезпечили цю передачу енергії, а також вивчити конструктивні зміни в найдавніших транспортних засобах (від саней-волокуш до колісних возів) і ґрунтообробних знаряддях (від рала до важкого плуга).
- Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички якісного аналізу біомеханічних та кінематичних систем в історичному контексті. Навчити розуміти інженерну логіку стародавніх майстрів, які оптимізували розподіл навантажень на тіло тварини та боролися з опором середовища (тертям і щільністю ґрунту) виключно емпіричним шляхом, без математичного апарату.
- Соціально-адаптивна:** Продемонструвати, як суто технічні та механічні інновації (вдосконалення упряжі чи плуга) стають каталізатором глибоких соціально-економічних змін: виникнення додаткового продукту, відокремлення ремесла від землеробства та розбудови міст. Виховувати розуміння того, що інженерія є первинним рушієм суспільного прогресу.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

- Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Тварина як перший автономний "двигун", а упряж — як перша "трансмсія" в історії техніки.
- Теоретичний блок (20 хв):** Біомеханіка тяглової сили. Порівняльний інженерний аналіз ярма та хомута. Еволюція засобів подолання тертя (сани і колесо) та опору ґрунту (рало і плуг).
- Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історичними контекстами. Аналіз впливу конструкції плуга на перехід до інтенсивного орного землеробства.
- Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерно-логістичних задач епохи ранніх слов'ян (оптимізація прохідності та тягового зусилля).
- Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА БІОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Для сучасного інженера джерелом енергії є електрика або паливо. Але для наших предків єдиним доступним макро-двигуном була тяглова тварина — віл або кінь. Проте мати потужного коня — це лише половина справи. Справжнім інженерним викликом було створення "інтерфейсу" для передачі його біологічної енергії до робочого органу (воза чи плуга). Ранні землероби стикалися з тими ж проблемами, що й сучасні конструктори автомобілів: як передати максимальне тягове зусилля, не "зламавши" двигун, і як мінімізувати втрати енергії на тертя об ґрунт. Розглянемо, як еволюція від ярма до хомута та від рала до відвального плуга здійснила першу справжню технічну революцію на українських землях».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз еволюції аграрної та транспортної механіки

Елемент / Технологія	Механічна сутність та історична інженерна логіка	Наслідки для ефективності
Ярмо (Шийна упряж)	Жорсткий дерев'яний фіксатор. Вектор тяги передавався від масивної шиї вола до дишла. Ідеально підходило для анатомії великої рогатої худоби, що рухається повільно і тягне вантаж усією масою, опустивши голову.	Забезпечувало високий крутний момент при низькій швидкості. Проте абсолютно не підходило для коня: при навантаженні ярмо перетискало йому дихальні шляхи (трахею), зменшуючи тягову

		ефективність до критичного мінімуму.
Хомут (Плечова упряж)	Інженерний прорив. Жорсткий овал із м'якою внутрішньою підкладкою, який спирається на лопатки (плечовий пояс) коня. Вектор сили тяги змістився з шиї на найміцніші м'язи грудей.	Кардинально змінив розподіл напружень. Звільнивши дихання коня, хомут дозволив використовувати всю його кінетичну енергію та швидкість. Ефективність тяги зросла в кілька разів.
Сани-волокуші	Транспорт, що працює виключно на тертя ковзання. Мають велику площу контакту з поверхнею, що радикально знижує питомий тиск на ґрунт.	Дозволяли перемішувати вантажі болотистими лісостеповими шляхами (влітку) або по снігу, де вузьке колесо раннього воза просто б загрузло до осі.
Колесо	Механізм, що замінює руйнівне тертя ковзання на значно ефективніше тертя кочення. У точці контакту з дорогою сила опору мінімальна, тертя ковзання залишається лише в зоні маточини та осі.	Революціонізувало логістику на твердих покриттях. Вимагало застосування міцної деревини (дуба, ясеня) для створення жорсткої конструкції зі спицями, здатної витримувати бічні удари.
Рало vs Плуг	Рало: симетричний дерев'яний клин, що просто розсуває ґрунт у два боки (двовимірна деформація). Плуг: асиметричний механізм із череслом (ніж), лемешем та дерев'яним відвалом. Відвал є складною просторовою поверхнею, яка не просто підрізає пласт ґрунту, а закручує його і перевертає на 180 градусів.	Відвальний плуг вимагав колосального тягового зусилля (кілька пар волів), але якість обробітку (знищення бур'янів, аерація ґрунту) дозволила перейти до інтенсивного землеробства, створюючи надлишок продовольства.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ ТА ІСТОРИЧНОГО КОНТЕКСТУ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історико-технологічний перехід від екстенсивного землеробства до інтенсивного, спираючись на закони механіки та розуміння фізичних властивостей ґрунтів.

Історичний контекст:

Ранні слов'яни, які заселяли лісову та лісостепову зони, спочатку використовували підсічно-вогневе землеробство. Ліс вирубували, спалювали, а отриманий попіл слугував добривом. Такий м'який, насичений органікою ґрунт легко розпушувався звичайним дерев'яним ралом-сукуваткою (фактично — колодою з обрубаними гілками). Однак через 2-3 роки земля виснажувалася, ущільнювалася, і громада мусила переходити на нову ділянку, вирубуючи новий ліс.

Перехід до осілого, орного землеробства на важких лісостепових суглинках і чорноземах став можливим лише завдяки появі залізного наконечника (наральника), а згодом — важкого колісного плуга з відвалом.

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Матеріалознавчий аспект:** Чому дерев'яне рало було ефективним на м'яких попелищах, але стало абсолютно непридатним на старих, зарослих травою землях (перелогах)? Поясніть це через різницю в міцності матеріалу інструмента та опорі ґрунтового масиву.
- Кінематичний аспект:** Проаналізуйте роботу відвалу важкого плуга як просторового механізму. Чому саме складне перевертання (асиметричне закручування) пласта ґрунту, на відміну від простого розсовування його ралом, стало технологічною революцією в агрономії? Яку механічну роботу при цьому виконує відвал?
- Енергетичний аспект:** Важкий відвальний плуг створював настільки великий опір, що його тягнули 3-4 пари волів. Як винахід хомута та заміна волів на коней вплинули на

швидкість обробітку поля, і чому це стимулювало розвиток ремесел та торгівлі у ранніх містах?

Еталон відповіді викладача:

1. Твердість і питомий опір цілинного ґрунту, пронизаного корінням трав, значно перевищують міцність звичайного дерева. Дерев'яний клин просто ламався або швидко стирався (абразивне зношування). Поява кованого залізного наральника, який зберігав гостроту і мав вищу твердість, дозволила різати щільний ґрунт, різко зменшивши необхідне тягове зусилля.
2. Рало діє як простий клин, залишаючи бур'яни на місці. Відвал плуга — це складна гвинтова поверхня. Його кінематика змушує підрізаний пласт землі здійснити обертання в просторі. При цьому бур'яни опиняються під землею, гинучи і перетворюючись на перегній, а нижній, насичений мінералами шар виноситься наверх. Механічна робота тут витрачається на складну 3D-деформацію пласта, але вона окупається збереженням родючості ділянки на десятиліття.
3. Хомут дозволив коню дихати і тягнути вантаж плечима. Кінь рухається значно швидше за вола. Збільшення швидкості оранки дозволило обробляти більші площі за короткий весняний період. З'явився стабільний надлишок зерна (додатковий продукт). Цей надлишок дозволив частині племені перестати займатися землеробством і стати професійними ковалями, гончарами чи воїнами, що стало економічним фундаментом для утворення ранніх слов'янських міст.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Логістична криза: Вибір транспортного засобу)

Ситуація: Ви — керівник торгової валки ранніх слов'ян у X столітті. Вам необхідно доставити велику партію меду та хутра з лісового поселення до великого торгового міста на річці (наприклад, Києва). Відстань — понад 50 кілометрів. Дороги як такої немає: шлях пролягає через заболочені лісові просіки, високу траву та м'який, вологий ґрунт. У вашому розпорядженні є міцні тяглові коні з хомутами, але ви повинні вибрати, на чому везти вантаж: на нових, щойно виготовлених колісних возах із вузькими дерев'яними колесами, чи на традиційних санях-волокушах.

Завдання: Спираючись на закони механіки (тиск на поверхню, тертя ковзання та кочення), обґрунтуйте вибір транспортного засобу. Чому в цій конкретній ситуації більш "передова" технологія може виявитися фатальною?

Очікуване рішення: Інженерний розрахунок вказує на вибір саней-волокуш, незважаючи на те, що надворі може бути літо. Колісний віз має вкрай малу площу контакту з ґрунтом (лише точки дотику вузьких дерев'яних ободів). Під вагою вантажу питомий тиск на м'який болотистий ґрунт буде настільки колосальним, що колеса миттєво проріжуть землю і загрузнуть до самих осей. Рух повністю заблокується, оскільки коням доведеться тягнути віз не коченням, а як плуг крізь багнюку. Натомість сани-волокуші мають довгі та широкі полози. Велика площа контакту розподіляє вагу вантажу, знижуючи тиск. На мокрій траві чи в багнюці коефіцієнт тертя ковзання дерева є відносно низьким. Волокуші будуть ковзати по поверхні болота, дозволяючи успішно доставити вантаж. Цей кейс вчить, що технологічне рішення завжди має адаптуватися до умов експлуатації.

Кейс 2 (Опір матеріалів: Конструювання дерев'яного колеса)

Ситуація: Ваша громада освоїла степові тверді шляхи, і виникла потреба у створенні надійних колісних возів. Перші спроби виготовляти суцільні колеса (просто відпилюючи поперечний кругляк від товстого стовбура дерева) закінчилися невдачею: такі колеса розколювалися навпіл після першого ж серйозного удару об камінь, а також були надзвичайно важкими, що швидко виснажувало тяглових тварин.

Завдання: Застосовуючи знання про будову деревини та розподіл механічних напружень, розробіть нову концепцію колеса, яка була б легкою і водночас витримувала б ударні (динамічні) навантаження від вибоїн на твердій дорозі.

Очікуване рішення: Суцільний кругляк (спіл) дерева розколюється легко, оскільки навантаження йде вздовж радіальних тріщин і річних кілець. Майстри винайшли **колесо зі спицями**. Це геніальна просторова конструкція, що складається з трьох елементів:

1. *Маточина (центральна втулка)*: виточується з найтвердішого дерева (дуба), оскільки несе колосальне навантаження на зминання від осі.
2. *Спиці*: виготовляються з пружного дерева (ясеня або в'яза). Вони працюють як пружини, приймаючи на себе енергію удару і злегка згинаючись (поздовжній згин), не даючи колесу розсіпатися.
3. *Обід (гнутий)*: виготовляється не з цільного шматка, а з вигнутих на пару дерев'яних дуг, де волокна деревини йдуть паралельно дузі. Це забезпечує максимальну стійкість на розрив.

Така збірна конструкція дозволила радикально зменшити масу колеса (зменшити моменти інерції) та підвищити його здатність поглинати удари (амортизацію), зробивши можливим далекі торгові мандрівки.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *ярмо, хомут, тертя ковзання, тертя кочення, питомий тиск на ґрунт, кінематика відвалу, спицеве колесо*.
- Скласти порівняльну таблицю (мінімум 3 критерії) кінематичних та функціональних відмінностей між дерев'яним ралом та важким відвальним плугом.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Еволюція тягової сили не обмежилася лише кінями. На українських землях тривалий час для найважчих транспортних робіт (наприклад, чумакування) використовували виключно волів.

- **Завдання:** Використовуючи історичні та зоотехнічні дані, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть з точки зору механіки та логістики, чому для транспортування надважких маж степовим бездоріжжям (де не було доріг із твердим покриттям, а лише розбиті колії) тяглова сила повільного, але потужного вола у жорсткому ярмі виявилася більш надійною і вигідною в доіндустріальну епоху, ніж використання швидших коней. Зверніть увагу на витривалість, крутий момент на старті та невибагливість до "палива" (підніжного корму).

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від ярма до хомути: як правильний розподіл механічних напружень змінив швидкість людської цивілізації».
2. «Інженерна боротьба з тертям: чому колесо не змогло повністю витіснити полози в логістиці ранніх слов'ян».
3. «Кінематика ґрунту: як зміна геометрії землеробного інструмента сформувала економічний фундамент Київської Русі».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології теоретичної механіки та розуміння фізичних процесів (тертя, тиск, розподіл сил) під час аналізу стародавніх технологій — **30 балів**.
- Логічність, інженерна обґрунтованість та здатність враховувати експлуатаційне середовище під час розв'язання фахових логістичних та агротехнічних кейсів — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати історичний інженерний досвід на загальні закони розвитку машинобудування у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 3: Принципи перетворення обертового руху в традиційних ремеслах Середньовіччя

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-кінематичного аналізу, вивчення інженерно-археологічних першоджерел та фахового кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Дослідити ключовий етап зародження прикладної механіки в Київській Русі — перехід від ручного інструменту до перших кінематичних машин у ремісничому

виробництві. Проаналізувати емпіричні принципи перетворення зворотно-поступального руху на обертовий (лучкові приводи) та механіку акумуляції енергії за допомогою махових мас (ножне гончарне коло).

2. **Методологічна:** Сформувати у майбутніх інженерів-механіків навички ретроспективного аналізу кінематичних пар та механічних передач доіндустріальної епохи. Навчити вербально і логічно описувати складні фізичні явища (інерцію, тертя, перетворення рухів) виключно через історичний контекст та інженерну доцільність, без використання сучасного математичного апарату формул.
3. **Соціально-адаптивна:** Використати історичний образ ремісника-новатора для формування проактивної професійної позиції. Продемонструвати, що здатність майстра оптимізувати своє робоче місце та винайти механізм для полегшення праці є основою технологічного лідерства, що безпосередньо вплинуло на урбанізацію та економічну незалежність давньоруських міст.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Анатомія людини як джерело лінійного руху та технологічна потреба ремесел у безперервному обертанні.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія середньовічних майстерень. Аналіз історичної еволюції гончарного кола та конструктивних особливостей перших токарних і свердлильних верстатів.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з археологічними звітами. Реконструкція кінематики інструментів за знахідками на київському Подолі та у Галичі.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач із подолання тертя, стабілізації осі обертання та адаптації до переривчастої кінематики різання.
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Будь-яке ремесло вимагає точності. Але людське тіло біомеханічно пристосоване переважно до рухів обмеженої амплітуди — зворотно-поступальних (рух пилки, рубанка) або маятникових (удар молотком). Натомість якісне формування ідеально круглого глиняного глечика або виточування симетричної дерев'яної чаші вимагає абсолютно іншої кінематики — швидкого та стабільного обертового руху. Викликом для майстрів Київської Русі стало створення "перехідників" між рукою людини та заготовкою. Як перетворити рух руки вперед-назад на швидке обертання шпинделя? Як змусити гончарне коло крутитися довго, якщо ти відпустив його руками? Розв'язання цих проблем лягло в основу перших справжніх верстатів, які стали історичними прашурами сучасного токарного і фрезерного обладнання».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз середньовічних ремісничих механізмів

Механізм / Пристрій	Кінематична сутність та інженерна проблема	Історичне вирішення та наслідки
Ручне гончарне коло	Диск, насаджений на вісь. Обертається однією рукою, поки інша формує глину. Проблема: швидка втрата швидкості через тертя і малу масу, що робить процес формування переривчастим.	Дозволяло виготовляти лише грубу, товстостінну кераміку. Майстер витрачав більше енергії на розкручування диска, ніж на корисну роботу з формування виробу.
Ножне гончарне коло (з маховиком)	Складна система з вертикальним валом, малим робочим столиком зверху та масивним дерев'яним диском унизу. Нижній диск розкручується ногами. Проблема:	Нижній диск діяв як акумулятор руху (маховик). Завдяки великій масі та інерції, він обертася довго і плавно. Звільнилися обидві руки майстра. Дозволило масово випускати

	необхідність стабілізації осі та мінімізації тертя у нижній опорі.	тонкостінний, стандартизований симетричний посуд.
Лучковий токарний верстат	Перша механічна трансмісія. Гнучка тятива лука обмотується навколо заготовки. Проблема: рух лука вперед-назад створює змінний (зворотно-обертовий) рух заготовки.	Майстер міг знімати стружку рістцем лише під час руху лука "на себе". При зворотному русі різець доводилося відводити. Незважаючи на переривчастість, це була революція: з'явилася жорстка фіксація заготовки (в центрах) та опора для різця (підручник).
Свердлильний пристрій (насосного типу)	Вертикальний шпиндель зі свердлом, горизонтальна планка і накручені мотузки. Рух планки вниз-вгору змушує шпиндель обертатися.	Дозволяв досягати високих швидкостей обертання. Ключовим інженерним елементом було важке пряслице (маховичок) на шпинделі, інерція якого змушувала мотузки накручуватися у зворотному напрямку після натискання.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ (АРХЕОЛОГІЇ)

Завдання для слухачів: Проаналізуйте результати археологічних розкопок ремісничих районів давньоруських міст та зробіть інженерні висновки.

Документ 1: Звіт з археологічних розкопок гончарних майстерень київського Подолу (XII ст.)

«Під час розчищення залишків гончарної майстерні було виявлено глибоко вкопаний у землю дубовий чурбак, у верхній частині якого знаходилося заглиблення (гніздо). У цьому гнізді зберігся гладко відшліфований камінь (кварцит) із невеликою лункою по центру. Поруч знайдено масивне дерев'яне колесо діаметром близько метра з квадратним отвором посередині, слідами сильного зносу на обідді та залишками тваринного жиру в зоні кріплення».

Документ 2: Аналіз дерев'яних виробів із розкопок Звенигорода Галицького

«Знайдені дерев'яні миски та кубки мають ідеально правильну круглу форму. На їхніх денцях та стінках під мікроскопом чітко простежуються паралельні концентричні смуги — сліди від гострого металевго різця. Також на зовнішніх поверхнях деяких заготовок збереглися невеликі заглиблення суворо по центральній осі виробу».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Трибологічний аспект:** Проаналізуйте знахідку на Подолі (Документ 1). Для чого гончарі вставляли твердий відшліфований камінь у дубову опору і використовували тваринний жир? Чому дерев'яний вал не можна було просто обертати у дерев'яному гнізді без кам'яної вставки?
- Кінематичний аспект:** Знайдене дерев'яне колесо мало діаметр близько метра. Як фізичний принцип інерції (чим більша маса та радіус колеса, тим важче його зупинити) працював на користь гончара під час формування опору в'язкої глини?
- Технологія машинобудування:** Про що свідчать центральні заглиблення на денцях дерев'яних кубків (Документ 2)? Який конструктивний елемент середньовічного токарного верстата залишав такі сліди, і чому жорстка фіксація осі обертання була головною умовою для отримання паралельних слідів від різця?

Еталон відповіді викладача:

- Камінь із лункою — це перший опорний підшипник ковзання (п'ятник). Обертання важкого вала з маховиком створювало колосальний тиск на точку опори. Тертя дерева об дерево призвело б до швидкого згоряння осі або її заклинювання. Твердий камінь мінімізував площу контакту, а тваринний жир працював як мастило, радикально знижуючи опір тертя, що дозволяло маховику довго зберігати швидкість.
- Великий діаметр колеса забезпечував йому функцію потужного маховика. Уся енергія, яку майстер передавав ногами, акумулювалася в цьому важкому диску. В'язка глина створює значний опір рукам майстра. Якби колесо було легким, воно б миттєво зупинилося. Маховик своєю інерцією "протягував" заготовку крізь опір рук, забезпечуючи плавність ходу.

3. Заглиблення на денцях — це сліди від металевих центрів (вістрів), якими заготовка жорстко затискала в станині токарного верстата. Ця фіксація позбавляла заготовку можливості коливатися, дозволяючи їй обертатися виключно навколо однієї осі. Тільки завдяки цьому різець міг знімати ідеально рівну стружку, залишаючи концентричні геометрично правильні кола.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Кінематична криза: Проблема зворотного ходу)

Ситуація: Ви — майстер-деревообробник Київської Русі. Ви щойно виготовили новий токарний верстат із лучковим приводом. Ваш підмайстер тягне лук туди-сюди, заготовка чудово і швидко обертається. Але виникає проблема: коли лук рухається "на себе", різець знімає гарну стружку, але коли підмайстер повертає лук "від себе", заготовка починає крутитися у зворотному напрямку. Різець при цьому не ріже, а сильно треться об дерево, тупиться, застрягає і псує гладку поверхню виробу.

Завдання: Спираючись на логіку механічної обробки матеріалів, запропонуйте техніку роботи, яка дозволить уникнути псування інструмента та виробу. Який додатковий елемент верстата є критично необхідним для реалізації цієї техніки?

Очікуване рішення: Головний недолік лучкового приводу — зворотно-обертовий рух. Змінити саму кінематику приводу наявними засобами неможливо. Отже, інженерне рішення полягає у зміні алгоритму роботи різцем. Майстер повинен здійснювати "циклічне різання". Під час робочого ходу лука (коли дерево набігає на лезо) майстер із силою притискає різець до заготовки. Щойно починається зворотний хід — майстер миттєво відводить (послаблює) різець на міліметр назад, уникаючи тертя. Щоб виконувати цю мікроскопічну і швидку роботу, тримати різець просто у висячому положенні неможливо — руки втомляться і дрижатимуть. Критично необхідним елементом є **підручник** — жорстка нерухома опора (дерев'яна планка), встановлена впритул до заготовки. Спираючись на підручник як на важіль, майстер може з ювелірною точністю дозувати подачу різця та вчасно його відводити.

Кейс 2 (Модернізація свердлильного пристрою)

Ситуація: Ювеліру необхідно просвердлити сотні тонких наскрізних отворів у кістяних та мідних пластинах для виготовлення прикрас. Ручне обертання свердла пальцями або долонями (як при добуванні вогню) не дає потрібної швидкості і швидко натирає мозолі. Звичайний лучковий привід (лук і тятиву) для дрібного вертикального свердла вимагає участі двох людей (один тримає свердло зверху, інший тягне лук), що економічно не вигідно.

Завдання: Як інженер-практик, застосуйте принцип акумуляції енергії для створення свердлильного пристрою насосного типу (Pump drill), яким могла б працювати одна людина, використовуючи лише одну руку для створення надшвидкого обертання. Що забезпечуватиме автоматичне намотування мотузок після кожного руху вниз?

Очікуване рішення: Інженерне розв'язання полягає у створенні системи з маховиком. Вертикальний стрижень зі свердлом на кінці пронизує горизонтальну рухома планку. До кінців планки і до верхівки стрижня прив'язані мотузки. На сам стрижень жорстко насаджується важкий диск (маховичок/пряслице).

Механіка процесу: Майстер вручну накручує мотузку на стрижень, планка при цьому піднімається вгору. Натискаючи на планку вниз, майстер змушує мотузку розкручуватися — стрижень починає швидко обертатися. Завдяки маховику, коли планка досягає нижньої точки, стрижень за інерцією продовжує обертатися в тому ж напрямку. Ця інерція змушує мотузку знову накрутитися на стрижень, піднімаючи планку вгору. Наступне натискання повторює цикл, але вже у зворотному напрямку. Майстер працює однією рукою, здійснюючи прості рухи вниз-вгору (як насосом), отримуючи надзвичайно високі обороти, необхідні для проходження твердих матеріалів.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *маховик, кінематична пара, шпиндель, лучкова передача, підручник, опорний підшипник, інерція.*

- Описати у вигляді таблиці ключові функціональні відмінності між роботою ручного та ножного гончарного кола з точки зору ефективності праці майстра.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Еволюція металообробки вимагала не лише свердління, але й заточування інструментів (сокир, мечів, різців).

- **Завдання:** Дослідіть історичну конструкцію середньовічного ножного точильного верстата (точила з круглим абразивним каменем). Напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть механізм перетворення коливального руху педалі на безперервний обертовий рух важкого точильного каменя. Яку роль у цьому пристрої відігравав кривошип (коліно на осі) і чому масивний кам'яний круг одночасно виконував функцію маховика для подолання "мертвих точок"?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від лучкового приводу до верстата з ЧПК: як людство подолало проблему переривчастості технологічного руху».
2. «Маховик як перший механічний акумулятор: інженерна геніальність середньовічного гончара».
3. «Еволюція кінематичних пар: як перехід від тертя дерева по дереву до кам'яних підшипників прискорив розвиток ремесел».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Розуміння історичного контексту та коректне оперування базовими поняттями прикладної механіки (перетворення рухів, інерція, тертя) під час аналізу середньовічних пристроїв — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових технологічних та кінематичних кейсів (без застосування сучасних формул) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність відслідкувати еволюцію технічної думки від середньовіччя до сучасності у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 4: Кінематика та балістика ранніх металевих машин (катапульт, баліст) в оборонній архітектурі

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-балістичного аналізу, вивчення еволюції військової інженерії та фахового кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Проаналізувати інженерні засади створення металевих артилерій та облогових машин античності й середньовіччя як перших в історії складних динамічних систем. Здійснити якісний (безформульний) фізичний аналіз процесів накопичення та вивільнення енергії у торсійних (заснованих на скручуванні) та гравітаційних (заснованих на протизвазі) машинах. Дослідити еволюцію оборонної архітектури як статичної реакції на появу потужних динамічних загроз.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички ретроспективного аналізу динамічних навантажень та кінематичних ланцюгів. Навчити розуміти емпіричну логіку стародавніх майстрів, які вирішували надскладні завдання з опору матеріалів, балістики та гасіння кінетичної енергії без застосування сучасного диференціального чи тензорного числення.
3. **Соціально-адаптивна:** Продемонструвати амбівалентну (подвійну) природу інженерної професії, де знання механіки можуть слугувати як руйнуванню, так і захисту. Використати історичний досвід проєктування міст-фортець для формування професійної етики сучасного інженера, чийм головним обов'язком є створення надійних систем безпеки та захисних споруд, здатних зберегти життя суспільства в умовах збройної агресії.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Військова справа як найпотужніший історичний каталізатор розвитку прикладної механіки та теорії пружності.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія руйнування та захисту. Порівняльний аналіз кінематики торсіонних машин (баліста, онагр) та гравітаційних механізмів (требюше). Еволюція геометрії фортечних мурів.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з першоджерелами. Аналіз античних і середньовічних трактатів про конструкцію металевих машин та проблеми втоми матеріалів і віддачі.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерно-балістичних та архітектурних задач в умовах історичної облоги (гасіння енергії удару, оптимізація траєкторії).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Протягом століть головним захистом міст були високі кам'яні мури. Аби їх зруйнувати, військовим інженерам знадобилося створити пристрої, здатні генерувати руйнівну силу, що в сотні разів перевищує можливості людини. Звичайний лук, який працює на згині дерева, мав свою межу міцності. Тоді стародавні механіки здійснили прорив — вони змусили матеріали працювати на скручування (торсіон) та використали невідворотну силу земного тяжіння. Створення баліст і требюше — це перші в історії приклади акумуляції величезної потенційної енергії з її наступним миттєвим вивільненням. Зі свого боку, архітектори-фортифікатори мусили реагувати на ці динамічні загрози, змінюючи геометрію мурів, аби ті могли поглинати або відбивати кінетичну енергію летючих кам'яних ядер. Цей двобій "меча і щита" заклав фундаментальні емпіричні основи сучасного матеріалознавства та балістики».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз військової механіки та фортифікації

Механізм / Структура	Інженерна та кінематична сутність	Вплив на тактику та архітектуру
Баліста (Торсіонна двоплеча машина)	Працює на скручуванні двох вертикальних пучків сухожилів. Коловорот відтягує тятиву, закручуючи пучки (накопичення енергії пружної деформації). При спуску пучки різко розкручуються.	Забезпечувала величезну початкову швидкість снаряда. Настільна (майже пряма) балістична траєкторія ідеально підходила для пробивання воріт та прицільного вогню.
Онагр / Катапульта (Торсіонна одноплеча машина)	Використовує один товстий горизонтальний моток жил, крізь який пропущено металевий важіль. Спуск важеля завершується нищівним ударом об поперечну балку-стопор.	Стрільба по високій параболическій траєкторії дозволяла перекидати снаряди через мури. Удар важеля об стопор генерував таку віддачу, що вимагав застосування масивних дубових рам.
Требуше (Гравітаційний важіль з працею)	Акумулятор енергії — масивна противага (десятки тонн каменю), піднята високо вгору. Метале плече значно довше за плече противаги. Робочий орган — праця.	Вершина середньовічної механіки. Праця діяла як додатковий шарнір (мультиплікатор швидкості). Здатність метати надважкі вантажі призвела до кризи високих середньовічних мурів.
Еволюція муру (Панцирна кладка і Талюс)	Перехід від суцільного каменю до композитної структури: дві зовнішні кам'яні стіни із забутовкою землею всередині. Нижня частина муру робиться похилою назовні (талюс).	Земляне ядро працювало як демпфер (амортизатор), поглинаючи енергію ударів ядер без наскрізних тріщин. Похилий талюс відбивав

		кінетичну енергію ядер угору рикошетом.
--	--	--

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте античні та середньовічні описи військових машин. Визначте, як стародавні інженери боролися з проблемами матеріалознавства, тертя та динамічних перевантажень.

Документ 1: Амміан Марцеллін (римський історик IV ст.) про роботу онагра

«У середині рами крізь товсті канати зі скручених жил просунутий дерев'яний важіль... До цього важеля прив'язується праща. Коли машину натягують коловоротом, важіль опускається. Потім майстер б'є молотом по заціпці, важіль вивільняється, стрімко летить вгору і б'є у товсту поперечну подушку з вовни та шкіри, викидаючи камінь. Машину цю називають "онагр" (дикий осел), бо коли дикі осли тікають від мисливців, вони відкидають назад каміння своїми копитами. Ставити таку машину на кам'яні стіни не можна, бо від сильного струсу при пострілі вона зруйнує будь-яку кам'яну кладку, тому її ставлять на земляні насипи».

Документ 2: Егідій Романо (архієпископ та теоретик військової справи, XIII ст.) про требюше

«Є машини, що кидають каміння за допомогою противаги. Вони мають довгу балку, поділену на дві нерівні частини. На короткій частині висить велика вага, а до довгої кріпиться праща з каменем. Чим важча противага і чим вона вище піднята, тим з більшою силою полетить камінь. Але особлива майстерність полягає у залізному гаку на кінці довгої балки. Одне кільце пращі має бути вільним. Якщо гак занадто прямий, камінь полетить прямо вгору. Якщо занадто загнутий — камінь вдариться об землю. Потрібно знайти міру, щоб камінь полетів далеко вперед».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

1. **Динаміка і резонанс:** Чому Амміан Марцеллін (Документ 1) наголошує на забороні ставити онагр на кам'яні мури? Поясніть механіку руйнівної віддачі цієї машини. Чому земляний насип вирішував цю інженерну проблему?
2. **Матеріалознавчий аспект:** Важіль онагра б'є у поперечну балку, оббиту вовною та шкірою. Для чого інженери використовували ці матеріали в зоні удару? Який сучасний механізм виконує аналогічну функцію гасіння пікових кінетичних навантажень?
3. **Кінематика і балістика:** Аналізуючи Документ 2, поясніть емпіричну роботу механізму розкриття пращі. Яким чином зміна кута залізного гака впливала на кут вильоту снаряда, і як стародавні артилеристи використовували відцентрову силу для розриву кінематичного ланцюга (зісковзування кільця)?

Еталон відповіді викладача:

1. При пострілі важіль онагра з величезною швидкістю вдаряється об стопор. Ця кінетична енергія не зникає — вона передається на раму машини у вигляді потужного вібраційного удару (віддачі). Жорстка кам'яно-вапняна кладка муру не має пружності, тому динамічний струс миттєво призводить до утворення в ній фатальних тріщин. Земляний насип, навпаки, є пластичним і чудово демпфує (поглинає) вібрації.
2. Вовна і шкіра використовувалися як амортизатори. Без цього м'якого прошарку жорсткий удар дерева об дерево неминуче призвів би до перелому металевого важеля або руйнування стопорної балки через перевищення межі міцності матеріалу. Сучасні аналоги — гумові відбійники, сайлентблоки або гідравлічні буфери.
3. Коли важіль требюше злітає вгору, праща здійснює круговий рух, виникає відцентрова сила, що натягує її. Кільце пращі, надіте на гак, утримується тертям і кутом нахилу. Коли важіль наближається до вертикалі, вектор сили натягу змінюється. Завдяки правильно підбраному куту гака, кільце під дією відцентрової сили зісковзує саме в той момент, коли снаряд знаходиться під ідеальним балістичним кутом до горизонту (близько 45 градусів), забезпечуючи максимальну дальність польоту.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Криза торсіонних матеріалів: Винахід Требюше)

Ситуація: Ви — головний військовий інженер армії, що здійснює облогу великої фортеці в умовах вологого клімату та постійних дощів. Ваша металева артилерія складається виключно

з важких баліст та онагрів (торсіонних машин). Через тиждень облоги виявляється, що дальність стрільби впала втричі, а машини ледве здатні докинути каміння до мурів. Командир армії вимагає результату.

Завдання: Спираючись на фізичні властивості матеріалів тваринного походження (сухожиль, волоса), поясніть причину різкого падіння потужності торсіонних механізмів. Запропонуйте командирі принципово іншу кінематичну схему метальної машини, джерело енергії якої абсолютно не залежить від погодних умов та вологості.

Очікуване рішення: Причина кризи лежить у гігроскопічності матеріалів: тваринні жили та волосся під дією вологи розбухають і катастрофічно втрачають свою пружність. Вони більше не здатні акумулювати достатню потенційну енергію скручування. Інженерне рішення полягає у відмові від енергії пружної деформації на користь енергії гравітації. Необхідно терміново збудувати требюше (фрондиболу). Її джерелом енергії є противага (ящик із камінням або землею). Вага каміння (сила тяжіння) залишається незмінною як у суху, так і в дощову погоду. Гравітація є найстабільнішим джерелом енергії для доіндустріальної артилерії.

Кейс 2 (Реорганізація оборони: Відповідь архітектора)

Ситуація: Ви — головний зодчий міста-фортеці. До появи требюше ваші високі (понад 15 метрів) та прямі кам'яні мури були неприступними для штурмових драбин. Але тепер ворог обстрілює місто масивними кам'яними ядрами вагою понад 100 кг, які летять по настільній або крутій траєкторії. Під їхніми ударами жорстка і тонка кам'яна кладка тріскається і обвалюється цілими секціями.

Завдання: Як інженер-будівельник, запропонуйте реконструкцію мурів. Змініть внутрішню структуру стіни та її зовнішню геометрію біля основи так, щоб максимально нейтралізувати кінетичну енергію масивних снарядів, не дозволяючи їм руйнувати кладку під прямим кутом.

Очікуване рішення:

1. **Структурна зміна (Перехід до панцирної кладки):** Замість суцільної кам'яної або цегляної стіни слід звести дві паралельні стінки, а простір між ними (ядро) засипати утрамбованою землею та бутовим каменем. Земля володіє високою пластичністю і діятиме як гігантський поглинач ударної хвилі, не дозволяючи тріщинам пронизувати мур наскрізь.
2. **Геометрична зміна (Талюс і Гласіс):** Вертикальна стіна приймає 100% енергії ядра при прямому влучанні. Необхідно добудувати нижню частину стіни у вигляді похилого укосу (талюса). Снаряд, що летить паралельно землі, вдаряючись об похилу площину, зрикошетить угору. Значна частина його кінетичної енергії буде відхилена, а не витрачена на руйнування каменю. Додатково перед ровом насипається пологий земляний пагорб (гласіс), який ховатиме найбільш вразливу основу муру від прямого наведення ворожої артилерії.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *кінетична енергія, потенційна енергія, пружна деформація, торсіонний механізм, параболічна траєкторія, праця, панцирна кладка, талюс.*
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові конструктивні та балістичні відмінності між катапультною (онагром) та балістою.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Еволюція металевих машин вимагала розуміння міцності дерев'яних балок.

- **Завдання:** Дослідіть кінематику довгого метального важеля требюше під час пострілу. Напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть, чому цей важіль робили не однакової товщини, а дуже масивним біля осі обертання і поступово звуженим до кінця, де кріпилася праця? Обґрунтуйте це інженерне рішення, спираючись на уявлення про зменшення маси (інерції) рухомого кінця та епюру згинальних моментів (де напруження на злам є максимальними).

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Требує як вінець середньовічної механіки: тріумф гравітації та принципу важеля над природними матеріалами».
2. «Від торсійного пучка до сталеві пружини: еволюція акумуляторів механічної енергії в історії техніки».
3. «Діалог руйнування та захисту: як балістика металевих машин змінила закони будівельної інженерії міст-фортець».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та розуміння фізичних процесів (накопичення енергії, пружність, віддача) під час аналізу історичних систем — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових балістичних та фортифікаційних кейсів в умовах обмежених технологій — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досвід військової механіки минулого на сучасні принципи конструювання та безпеки у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 5: Аналіз конструкцій та розрахунок потужності традиційних млинових механізмів

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-кінематичного аналізу, вивчення емпіричної гідро- та аеродинаміки і фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Дослідити млинарство доби раннього модерну (XVI–XVIII ст.) як найпотужніший рушій доіндустріальної економіки на українських землях. Проаналізувати конструктивні схеми водяних (верхньобійних і нижньобійних) та вітряних (стовпових і шатрових) млинів. Вивчити емпіричні принципи передачі та мультиплікації крутного моменту за допомогою виключно дерев'яних зубчастих (цівкових) передач.
2. **Методологічна:** Сформулювати у майбутніх інженерів спеціальності «Прикладна механіка» навички вербального і логічного аналізу складних кінематичних ланцюгів. Навчити розуміти, як стародавні мірошники і стельмахи без математичного апарату та диференціальних рівнянь розв'язували проблеми підвищення кутової швидкості, подолання тертя та ефективного перетворення потенційної і кінетичної енергії природних стихій на корисну механічну роботу.
3. **Соціально-адаптивна:** Використати історичний концепт млина як першого автономного енергетичного комплексу для формування професійної етики сучасного інженера. Продемонструвати, що створення децентралізованих, сталих та незалежних джерел енергії (якими були млини для кожної громади) є фундаментом економічної безпеки і життєстійкості нації, що є надзвичайно актуальним завданням для повоєнної відбудови України.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Перехід від сили м'язів до сили стихій: млин як перша стаціонарна машина-двигун.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія млинарства. Емпірична гідродинаміка водяних коліс та аеродинаміка вітряків. Будова та кінематика цівкової трансмісії (мультиплікатора).
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історико-етнографічними першоджерелами та звичасвим правом млинарів. Аналіз монополії на технологію та відповідальності майстра.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач (подолання тертя, оптимізація водоскиду, стабілізація частоти обертання).

5. Підсумковий блок (15 хв): Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «До винайдення парової машини млини були абсолютними рекордсменами з генерування механічної потужності. Для українських міст і сіл млин був не просто місцем помелу борошна, а справжнім багатофункціональним промисловим хабом. Енергію водяного колеса використовували для кування металу в руднях, валяння сукна у фолюшах та розпилювання деревини на тартаках. З точки зору прикладної механіки, млин — це перша складна трансмісійна система. Інженерам-мірошникам потрібно було взяти повільний, масивний рух крил вітряка або водяного колеса і перетворити його на швидке, стабільне обертання важкого кам'яного жорна. Не маючи ані сталевих підшипників, ані точного лиття для шестерень, вони досягли цього завдяки геніальному розумінню властивостей різних порід деревини та емпіричному відчуттю законів статички і динаміки».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз традиційних млинових механізмів

Тип механізму	Емпірична кінематична та енергетична сутність	Інженерні переваги та недоліки
Нижньобійне водяне колесо	Приводилося в рух динамічним ударом текучої води об плоскі лопаті, занурені в потік. Робота виконувалася виключно за рахунок швидкості течії.	Переваги: Не вимагало побудови складних гребель, монтувалося безпосередньо на швидких річках. Недоліки: Вкрай низька ефективність, оскільки більша частина маси води просто обтікала колесо, не передаючи йому свою енергію.
Верхньобійне водяне колесо	Вода подавалася по спеціальному лотку на вершину колеса, заповнюючи ковшоподібні лопаті. Колесо оберталося під вагою води (за рахунок сили тяжіння).	Переваги: Кардинальне зростання ефективності, адже використовувалася потенційна енергія маси води. Можливість контролювати потужність, перекриваючи потік засувкою. Недоліки: Вимагало колосальних земляних робіт (дамби) для створення штучного перепаду висот (напору).
Стовповий вітряк	Уся масивна будівля млина разом із жорнами спиралася на один центральний дубовий стовп. Щоб «зловити» вітер, мірошник повертав весь корпус цілком за допомогою довгого важеля (води́ла).	Переваги: Простота кінематичної схеми. Недоліки: Через необхідність обертати величезну масу, розмір крил та самої будівлі був критично обмежений, що лімітувало максимальну потужність.
Шатровий вітряк	Будівля вітряка (вежа) була стаціонарною. Назустріч вітру оберталося лише верхня рухома частина («шапка») з крилами та головним валом, яка спиралася на роликовий вінець.	Переваги: Стаціонарна вежа дозволила робити вітряки дуже високими (де швидкість вітру більша) та встановлювати довгі крила. Можливість підключення кількох пар жорен одночасно.
Цівкова передача (Трансмісія)	Головне палечне колесо (з дерев'яними зубами-пальцями) зчіплювалося з малою шестірнею, яка складалася з двох дисків, з'єднаних стрижнями (цівками).	Сутність: Діяла як підвищувальний редуктор (мультиплікатор). За один оберт великого колеса мала цівкова шестірня робила кілька обертів, забезпечуючи високу кутову швидкість жорна.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історичні описи роботи млинових механізмів. Визначте, як стародавні мірошники емпірично розуміли закони кінематики, механічної роботи та трибології (науки про тертя).

Документ 1: Із записів французького інженера Г. Л. де Боплана (XVII ст.) про українські млини

«...На їхніх річках збудовано багато млинів. Але там, де вода тече повільно, вони будують високі земляні греблі, щоб зібрати великі ставки. Коли вода падає з висоти на ковші колеса, воно крутиться з такою силою, що приводить у рух не лише камені для борошна, але й важкі залізні молоти, які куять залізо для їхніх мушкетів. Дерев'яні колеса всередині млина зроблені так майстерно: велике колесо з кілками обертає мале колесо, і камінь крутиться дуже швидко, хоча вода тече повільно. Але коли вітру немає, а ставки пересихають, їхні ковалі та пекарі зупиняють роботу...»

Документ 2: Звичаєве право українських мірошників (Традиції вибору деревини)

«Головний вал, що крила тримає, робиться тільки з найтовстішого дуба, бо він має витримати і бурю, і вагу. А от "пальці" для великого колеса і "цівки" для малого — ніколи з дуба не роблять. Їх виточують з граба, яблуні або білої акації, які довго сушать у затінку. Бо якщо зробити їх із дуба, вони почнуть скрипіти, тріскатися і швидко перетруться на пил. А яблуня з грабом під час роботи ніби самі себе змашують, стають гладкими як кістка, і служать роками».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

1. **Енергетичний аспект:** Проаналізуйте спостереження Боплана щодо будівництва гребель. З точки зору емпіричного розуміння фізики, чому мірошникам було вигідніше інвестувати колосальну працю в створення земляної греблі та перехід до верхньобійного колеса, ніж просто поставити колесо в повільну річку? Який вид енергії вони навчилися акумулювати?
2. **Кінематичний аспект:** Опишіть логіку роботи млинової трансмісії. Чому для якісного помелу зерна велике палечне колесо мусило обертати мале цівкове, а не навпаки? Як мірошники відчували на практиці, що збільшення швидкості обертання жорна неминуче супроводжується втратою тягового зусилля (крутного моменту)?
3. **Трибологічний та матеріалознавчий аспект:** Проаналізуйте Документ 2. З інженерної точки зору, чому використання надміцного дуба для тертьових деталей (пальців та цівок) було фатальною помилкою? У чому полягав секрет застосування граба чи яблуні для поверхонь, що знаходяться у постійному контакті та ковзанні?

Еталон відповіді викладача:

1. Повільна течія річки несла замало кінетичної енергії. Створюючи греблю, інженери минулого переходили від використання кінетичної енергії води до її потенційної енергії. Піднята над рівнем колеса маса води отримувала величезну енергію гравітації (ваги). Коли вода падала на ковші, її вага створювала потужний обертальний момент, достатній не лише для перетирання зерна, але й для підйому важких ковальських молотів.
2. Жорно має обертатися швидко, щоб відцентрова сила рівномірно розподіляла зерно і борошно між каменями, а тертя якісно стирало оболонку зернини. Головний вал від води чи вітру обертається дуже повільно. Велика шестірня, зчеплена з малою, діє як мультиплікатор швидкості. Мірошники емпірично розуміли: якщо жорно занадто важке, швидкість його обертання впаде, бо крутий момент після мультиплікації зменшується. Інженер мусив знаходити ідеальний баланс між масою каменя, площею крил вітряка та співвідношенням зубців.
3. Дуб — чудове дерево для статичних і повільних навантажень (балок, валів). Проте деревина дуба має пористу структуру з великим вмістом дубильних речовин, що робить її крихкою при точкових ударних навантаженнях і створює високий коефіцієнт тертя ковзання. Граб або яблуня мають надзвичайно щільну, однорідну (дрібнопористу) структуру. При постійному терті вони поліруються, не залишаючи скалок, а їхні природні соки та смоли діють як сухе тверде мастило, різко знижуючи руйнівне тертя та нагрівання в зоні контакту зубців.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Кінематична криза: Нестабільність вітру та регулювання ходу)

Ситуація: Ви — мірошник шатрового вітряка. Ваш млин має ідеально виточені цівкові передачі та важке якісне жорно. Проблема полягає в природі вітру: він то стихає, то дме поривами. Коли вітер занадто слабкий, жорно крутиться повільно, і зерно просто мнеться, а не розтирається на дрібне борошно. Коли раптово налітає штормовий вітер, жорно розкручується до шаленої швидкості, тертя між каменями перепалює борошно (робить його темним і гірким), а сам механізм може розлетітися від відцентрових сил.

Завдання: Використовуючи доступні механічні та аеродинамічні інструменти традиційного вітряка, опишіть алгоритм ваших дій для стабілізації частоти обертання. Як змінити крутий момент, не зупиняючи процес помелу повністю?

Очікуване рішення: Сучасний інженер вирішив би це за допомогою електронного частотного перетворювача. Доіндустріальний мірошник застосовував механічне та аеродинамічне регулювання:

1. **Аеродинамічне регулювання:** Крила вітряка являють собою дерев'яні решітки, на які натягується парусина. Якщо вітер посилюється і швидкість стає небезпечною, мірошник частково згортає (зменшує площу) парусини на кожному крилі, зменшуючи парусність і, відповідно, енергію, яку крило забирає у вітру.
2. **Гальмівна система:** На головному колесі вітряка встановлювалася гнучка дерев'яна гальмівна стрічка (колодка), притискаючи яку за допомогою важеля, мірошник створював штучне тертя, гасячи зайву кінетичну енергію системи.
3. **Кінематичне навантаження (Зміна зазору):** Спеціальним гвинтовим або клиновим механізмом мірошник міг трохи підняти або опустити верхнє (рухоме) жорно. Опускаючи його ближче до нижнього каменя, він збільшував опір розтиранню зерна. Цей підвищений опір гальмував обертання вітряка під час сильних поривів вітру, одночасно покращуючи якість дрібного помелу.

Кейс 2 (Гідротехнічна оптимізація: Від швидкості до маси)

Ситуація: Ваша громада стоїть на березі широкої рівнинної річки з дуже повільною течією, але великим об'ємом води. Старі майстри побудували тут нижньобійний млин (колесо занурене прямо в річку). Проте його потужності ледь вистачає, щоб крутити одне мале жорно. Швидкість течії неможливо збільшити природним шляхом.

Завдання: Запропонуйте кардинальну реконструкцію гідротехнічного вузла. Яким чином зміна просторової організації водного потоку та конструкції колеса дозволить перетворити цей повільний рух на джерело енергії, здатне обертати одразу три великі жорна?

Очікуване рішення: Нинішня система використовує лише кінетичну енергію швидкості, якої в цій річці бракує. Інженерне рішення полягає у переході до використання потенційної енергії маси води.

Необхідно звести поперек річки міцну земляну або дерев'яну дамбу, утворивши став. Рівень води перед дамбою значно підніметься. Нижньобійне колесо слід замінити на **верхньобійне** або **середньобійне** ковшового типу. Вода по спеціально збудованому дерев'яному лотку відводиться від верху ставу і подається на верхню частину нового колеса. Тепер колесо обертається не від швидкості течії, а від **ваги** води, що безперервно заповнює його ковші з одного боку і тисне вниз. Колосальна маса води, що падає з висоти створеного дамбою напору, генеруватиме величезний крутий момент, достатній для потужної мультиплікації та одночасної роботи кількох кінематичних ліній.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *цівкова передача, мультиплікатор, крутий момент, верхньобійне водяне колесо, шатровий вітряк, потенційна енергія, трибологія.*
- Описати у вигляді таблиці 3 фундаментальні відмінності в інженерній конструкції та зручності експлуатації між стовповим та шатровим вітряком.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Дерев'яні деталі млинових механізмів, які працювали у вологому середовищі (вал водяного колеса) або піддавалися атмосферним опадам (крила вітряка), були схильні до швидкого біологічного руйнування (гниття).

- **Завдання:** Знайдіть історичну інформацію про те, які емпіричні способи захисту деревини (прототипи сучасного антисептування та консервації) використовували стародавні будівельники. Коротко (0,5 сторінки) проаналізуйте технології осмолення (обробки дьогтем) та поверхневого обпалювання деревини з точки зору створення захисного бар'єра для мікроорганізмів та вологи.

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Цівкова передача як предтеча сучасних редукторів: триумф інтуїтивного опору матеріалів у млинарстві».
2. «Від примх вітру до контрольованої стабільності: як механічні гальма та зміна парусності крил заклали основи систем керування».
3. «Водяний млин як перша стаціонарна електростанція минулого: інженерні та екологічні уроки приборкання річок».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та здатність вербально описувати перетворення енергії і крутного моменту без сучасних формул — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна обґрунтованість під час розв'язання фахових гідродинамічних та трибологічних кейсів млинарства — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досвід доіндустріальної автономної енергетики на сучасні проблеми сталого розвитку у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 6: Передача енергії та зубчасті зачеплення в мануфактурному виробництві Гетьманщини

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-кінематичного аналізу, вивчення індустріальної археології та фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Дослідити процеси зародження мануфактурного виробництва на українських землях у добу Гетьманщини (XVII–XVIII ст.). Проаналізувати інженерні принципи використання енергії води для приводу важких ковальських молотів, міхів та свердлильних верстатів у козацьких руднях, гамарнях та зброярнях.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички якісного аналізу механізмів перетворення рухів (зокрема, від обертального до зворотно-поступального за допомогою кулачкових валів). Навчити розуміти емпіричні способи боротьби зі втомою матеріалів, динамічними (ударними) навантаженнями та тертям у складних промислових трансмісіях без застосування сучасного математичного апарату.
3. **Соціально-адаптивна:** Продемонструвати нерозривний зв'язок між рівнем розвитку технологій механічної обробки матеріалів та державним суверенітетом. Виховати розуміння того, що здатність українських інженерів-людвисарів та майстрів-зброярів створювати власні автоматизовані мануфактури була фундаментом військової та економічної незалежності Козацької держави.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Перехід від ручного кування до водяних молотів як перша індустріалізація металообробки.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Кінематика козацьких мануфактур. Аналіз конструкції кулачкових механізмів, трансмісійних валів та систем механічного дуття.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історичними свідченнями. Аналіз описів технологічних процесів у козацьких руднях та оцінка якості металургійного виробництва.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач (подолання ударних навантажень на вали, розробка кінематики свердління артилерійських стволів).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Озброїти багатотисячне козацьке військо мушкетами, шаблями, а головне — високоякісною артилерією, спираючись лише на ручну працю сільських ковалів, було фізично неможливо. Гетьманщина потребувала масового, безперервного та потужного виробництва. Так на річках України масово з'являються рудні (металургійні підприємства) та гамарні (ковальські мануфактури). Серцем цих підприємств залишалося водяне колесо. Проте перед інженерами постало абсолютно нове кінематичне завдання. Якщо у млині достатньо було передати обертання від колеса до жорна, то в кузні потрібно було бити молотом і розтягувати міхи. Тобто, необхідно було перетворити безперервний обертальний рух на потужний зворотно-поступальний (лінійний) рух. Винайдення та широке застосування масивних кулачкових валів здійснило справжню революцію в прикладній механіці, заклавши емпіричні основи конструювання газорозподільних механізмів та ударних пресів сучасного машинобудування».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз механізмів мануфактурного виробництва

Елемент мануфактури	Механічна сутність та кінематика	Інженерне та виробниче значення
Головний трансмісійний вал	Масивна дубова колода, що безпосередньо сприймала обертання від водяного колеса. Кінці вала (цапфи) обковувалися залізом і оберталися у відкритих кам'яних або металевих підшипниках ковзання.	Передавав колосальний крутний момент на всі робочі органи цеху. Зазнавав критичних знакозмінних навантажень на кручення та згин через постійні удари механізмів.
Кулачковий механізм (Важкий молот)	На головному валу жорстко кріпилися дерев'яні або металеві виступи (кулачки). Під час обертання вала кулачок наїжджав на хвіст довгого важеля, на іншому кінці якого був масивний залізний молот (до 500 кг). Хвіст опускався — молот підіймався (накопичення потенційної енергії). Коли кулачок сховався, молот вільно падав на ковадло.	Автоматизував процес віджимання шлаків із розпеченої криці (губчастого заліза) та проковування металу. Дозволив обробляти масиви сталі, які неможливо було прокувати ручними молотами, забезпечуючи високу щільність та однорідність збройового металу.
Механізація дуття (Міхи)	Кулачки головного вала по черзі натискали на важелі величезних шкіряних міхів, стискаючи їх і виштовхуючи повітря у піч. Повернення міха у початковий стан здійснювалося за допомогою важкої противаги (балансира), що розтягувала шкіру назад.	Забезпечувало стабільний, безперервний потік кисню під високим тиском у плавильні печі (домниці). Це дозволило різко підвищити температуру плавлення, необхідну для якісного лиття чавуну та бронзи.
Свердлильний пристрій для гармат	Передача обертання від водяного колеса через зубчасті колеса на горизонтальний металевий вал, на кінці якого кріпилося довге свердло. Гарматний ствол насувався на свердло за допомогою системи важелів або тягарців.	Революція в точності артилерії. Дозволило відмовитися від відливання порожнистих стволів (що часто мали приховані дефекти і розривалися) на користь висвердлювання каналу ствола у суцільнолитій металевій заготовці.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історичні описи технологічних процесів у металургійних та збройових мануфактурах. Визначте, як стародавні майстри вирішували проблеми динаміки, міцності та забезпечення якості виробів.

Документ 1: 3 описів технологічного процесу козацької рудні (XVII ст.)

«Вода, падаючи на велике колесо, крутить грубе дерево [вал], у яке вбиті міцні дубові зуби. Ті зуби налягають на кінець довгого колодища, що має на собі ковадо [молот] залізне, вельми тяжке. Зуб тисне, колодище піднімається високо, а як зуб зісковзне — молот падає з великим гуркотом на розпечене залізо. І так б'є безупинно, вибиваючи з металу весь бруд і шлак, аж поки залізо не стане чистим і міцним, придатним для кування шабель та мушкетних стволів. А щоб дерево від тих ударів не розлетілося, його обковують товстими залізними обручами».

Документ 2: Вимоги до артилерії в армії Гетьманщини (Записки гармашів)

«Гармата має бути вилита рівно, без раковин і пустот всередині міді [бронзи], бо інакше при пострілі розірветься і поб'є своїх же. Раніше лили на глиняний стрижень, але часто стінка виходила з одного боку товста, а з іншого тонка. Тепер же майстри-людвисари ллють гармату цільним шматком, а потім водяним колесом і міцним сталевим свердлом вибирають середину. Такий ствол б'є точно і служить довго».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

1. **Динамічний аспект:** Проаналізуйте роботу важкого хвостового молота (Документ 1). Під час падіння 500-кілограмового бойка на ковадло виникає колосальна енергія удару. Куди, окрім деформації розпеченого металу, поширюються ударні вібрації? Чому інженери не робили важіль молота з суцільного металу, віддаючи перевагу деревині, обкутій обручами?
2. **Трибологічний та кінематичний аспект:** Опишіть точку контакту між кулачком обертового вала і хвостом важеля молота. Який вид тертя там виникає? Як майстри мінімізували зношування цих дерев'яних деталей при постійному терті під величезним навантаженням?
3. **Технологія машинобудування:** Порівняйте дві технології створення каналу гарматного ствола (Документ 2). Чому лиття навколо глиняного сердечника було ненадійним з точки зору опору матеріалів (внутрішній тиск порохових газів)? Як впровадження механічного свердління за допомогою енергії води вплинуло на балістику та надійність козацької артилерії?

Еталон відповіді викладача:

1. Енергія удару частково гаситься деформацією заготовки, але значна частина у вигляді сейсмічних вібрацій передається на ковадло, станину та сам важіль молота. Металевий важіль під дією таких високочастотних циклічних ударів швидко б зазнав втоми матеріалу, кристалізувався і тріснув (крихкий злам). Масивне дерев'яне «колодище» працює як природний демпфер (амортизатор), поглинаючи і розсіюючи енергію вібрацій за рахунок своєї волокнистої структури. Залізні обручі ж забезпечували цілісність деревини, не даючи їй розщепитися.
2. У точці контакту кулачка і хвоста важеля виникає важке тертя ковзання при високому контактному тиску. Для запобігання швидкому стиранню на хвіст важеля та на самі кулачки набивали товсті залізні пластини (робочі поверхні). Крім того, ці вузли постійно змащували дьогтем або тваринним салом, створюючи плівку, яка зменшувала зношування та відводила тепло.
3. При литті на сердечник струмין рідкого металу міг змістити глиняний стрижень, через що стінки гармати ставали нерівномірними (ексцентриситет). У місці тонкої стінки напруження від тиску порохових газів перевищувало межу міцності металу, що призводило до розриву ствола. Механічне свердління суцільної відливки гарантувало ідеальну циліндричність каналу і рівномірну товщину стінок по всій довжині. Це різко підвищило тиск, який могла витримати гармата, збільшило дальність, точність стрільби та безпеку гармашів.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Кінематична криза: Злам кулачкового вала)

Ситуація: Ви — головний інженер (майстер) великої козацької гамарні. Нещодавно був встановлений новий масивний головний вал, який приводить у рух одразу два важкі хвостові молоти. Проте через кілька днів інтенсивної роботи вал раптово тріснув навпіл через колосальні динамічні навантаження, зупинивши все виробництво. Аналіз показав, що деревина була якісною, без внутрішніх дефектів.

Завдання: Спираючись на розуміння динаміки обертального руху та розподілу напружень, виявіть конструктивну помилку в розташуванні кулачків на валу. Запропонуйте нову кінематичну схему розміщення кулачків, яка дозволить збалансувати навантаження на вал та запобігти його скручуванню і зламу в майбутньому.

Очікуване рішення: Помилка полягала в синхронізації ударів. Ймовірно, кулачки для обох молотів були встановлені на одній лінії (в одній фазі). Під час обертання вал одночасно натискав на хвости обох молотів. Це створювало пікове, подвійне навантаження на кручення головного вала (максимальний крутний момент опору). Відразу після зриву молотів опір миттєво зникав, створюючи жорсткий кінематичний удар, що й призвело до руйнування від знакозмінних навантажень.

Інженерне рішення: Кулачки для різних молотів необхідно розташувати на валу **в шаховому порядку (зі зсувом фаз)**. Якщо вал обслуговує два молоти, кулачки другого молота мають бути зміщені на певний кут відносно першого. Таким чином, поки один молот піднімається (максимальний опір), інший здійснює вільне падіння. Навантаження на кручення головного вала стає рівномірним, згладженим, пікові динамічні удари зникають, а загальна довговічність мануфактури радикально зростає. Це історичний прообраз балансування колінчастих валів сучасних двигунів.

Кейс 2 (Модернізація зброярні: Від кованого ствола до свердленого)

Ситуація: Уряд Гетьманщини робить велике замовлення на виготовлення мушкетів. Традиційно місцеві ковалі виготовляли стволи, нагріваючи плоску залізну штабу і сковуючи її трубкою навколо металевого стрижня. Проте такі стволи часто мають приховані непровари у зварному шві, швидко іржавіють зсередини через нерівності і часто розриваються в руках козаків при передозуванні пороху.

Завдання: Як інженер, якому доручено організувати нову зброярню, запропонуйте перехід на технологію глибокого свердління мушкетних стволів із суцільного залізного прута. Поясніть кінематику механізму, що приводиться в рух від водяного колеса. Як ви забезпечите точність (співвісність) свердління, щоб свердло не відхилилося вбік при проходженні метрової металевої заготовки?

Очікуване рішення: Технологія кованого шва має природний концентратор напружень. Свердління суцільної поковки (прута) усуває цей ризик.

Механіка процесу: Від водяного колеса через зубчасту або пасову передачу обертання передається на горизонтальний шпиндель. У шпинделі жорстко затискається довге списоподібне свердло.

Проблема співвісності є ключовою (якщо свердло піде вбік, стінка ствола буде прорвана). Інженерне рішення полягає у **русі заготовки, а не свердла**. Свердло обертається нерухомо в просторі. Суцільний залізний прут закріплюється на масивних дерев'яних санчатах (каретці), які рухаються по ідеально рівних направляючих (станині). Каретка із заготовкою повільно насувається на обертове свердло за допомогою гвинтової передачі або системи блоків і тягарців, які забезпечують постійну, рівномірну подачу. Саме фіксація осі обертання свердла та жорстке, геометрично правильне насування заготовки забезпечують ідеальну циліндричність каналу ствола.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *кулачковий механізм, хвостовий молот, зворотно-поступальний рух, крутний момент, демпфування, ексцентриситет, границя міцності, цапфа*.
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові відмінності між ручним ковальським міхом та механізованим міхом мануфактури (щодо кінематики, продуктивності та безперервності процесу).

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Важкі водяні молоти завдавали до 100 ударів на хвилину. Тривала експлуатація такого механізму призводила до екстремального зношування осі, на якій гойдався дерев'яний важіль молота.

- **Завдання:** Використовуючи принципи трибології та знання про конструкції доіндустріальних механізмів, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть, чому вісь обертання важеля молота ніколи не кріпили "намертво" до станини. Яку функцію виконували масивні пружні дерев'яні опори (часто зроблені з цільних стовбурів дерев, глибоко вкопаних у землю), між якими затискала ця вісь? Як ця конструкція рятувала систему від миттєвого руйнування при ударних віддачах?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від водяного колеса до гарматного ствола: як кінематика кулачкових механізмів викувала військову міць Гетьманщини».
2. «Інженерія мануфактури: емпіричні рішення проблеми втоми матеріалів та динамічних ударів у доіндустріальній металообробці».
3. «Дерево, що кує залізо: синергія матеріалознавства та біоміметики в конструкціях важких водяних молотів».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та здатність вербально описувати складні кінематичні перетворення (від обертання до удару) без застосування математичних формул — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна обґрунтованість під час розв'язання фахових мануфактурних кейсів (балансування валів, точність механічної обробки) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досвід інженерів доби Гетьманщини на загальні закони розвитку машинобудування у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 7: Дослідження етапів розвитку вимірювальних пристроїв та точної механіки

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-кінематичного аналізу, вивчення еволюції прецизійних систем та фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Дослідити зародження міської точної механіки в епоху раннього модерну на прикладі еволюції конструкцій баштових годинників на ратушах міст з Магдебурзьким правом. Проаналізувати етапи розвитку вимірювальних пристроїв від примітивних гравітаційних механізмів до складних систем із застосуванням анкерних спусків та маятникових регуляторів ходу.
2. **Методологічна:** Сформувати у майбутніх інженерів зі спеціальності «Прикладна механіка» навички вербального ретроспективного аналізу мікромеханічних процесів. Навчити описувати явища тертя (трибологію), дискретного перетворення енергії та ізохронності коливань виключно через інженерну логіку та історичний контекст, без використання сучасного математичного апарату та диференціальних рівнянь.
3. **Соціально-адаптивна:** Продемонструвати вплив технологічного прогресу на організацію суспільства. Виховати розуміння того, що створення еталона часу перетворило час на економічну та правову категорію, а підвищення вимог до точності деталей заклало фундаментальні основи для сучасної інженерної етики, де мікронна похибка має колосальні макроекономічні наслідки.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Від макромеханіки (млинів та молотів) до мікромеханіки: годинник як перший автономний високоточний автомат.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія контрольованої енергії. Еволюція зубчастих передач та профілювання зубців. Кінематичний аналіз спускових механізмів (шпіндельного та анкерного) і маятникового регулятора.

3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історичними першоджерелами. Аналіз проблем тертя, зношування матеріалів та втрати точності в ранніх ратушних годинниках.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач (боротьба з відкотом механізму, перехід від ковальського інструменту до зубофрезерних пристроїв).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Усі попередні механізми, які ми розглядали (катапульти, водяні молоти, млини), мали спільну мету — вивільнити максимальну кількість енергії для виконання грубої фізичної роботи. Зародження годинникарства поставило перед прикладною механікою абсолютно протилежне завдання. Енергію піднятої гири потрібно було вивільняти не миттєво, а мікроскопічними, суворо дозованими порціями протягом доби або тижня. Годинник став першим пристроєм, де швидкість і точність руху стали важливішими за потужність. Для забезпечення безперебійної роботи системи з тисяч дрібних деталей інженерам довелося вперше серйозно замислитися над ідеальною геометрією зубчастих передач, мінімізацією тертя та створенням механічного «мозку» приладу — регулятора ходу. Ця еволюція перетворила коваля на годинникаря-приладиста, заклавши основи всієї сучасної точної механіки та верстатобудування».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз еволюції вимірювальних механізмів

Елемент механізму	Кінематична сутність та інженерна проблема	Історичне вирішення та наслідки
Гравітаційний привід	Масивний барабан, на який намотано канат із важкою гирею. Під дією земного тяжіння гири намагається впасти з прискоренням, розкручуючи барабан.	Необхідність штучного гальмування цього падіння призвела до винаходу зубчастих редукторів та спускового механізму, що перетворив кінетичну енергію падіння на корисний контрольований рух.
Шпindelний спуск (Verge escapement)	Найдавніший регулятор. Коронне колесо впирається поперемінно у дві лопатки (палети) на вертикальній осі (шпindelі). Створює переривчастий рух.	Недолік: Механізм мав ефект «відкоту» (колесо після удару по лопатці мусило трохи відкрутитися назад). Це генерувало колосальне непотрібне тертя, швидкий знос деталей та низьку точність (похибка до пів години на добу).
Анкерний спуск (Anchor escapement)	Револьюційна кінематична схема. Ходове колесо та якірна вилка (анкер) рухаються в одній площині. Зубці колеса ковзають по скошених площинах палет вилки, передаючи мікроімпульс.	Перевага: Ліквідовано ефект «відкоту». Кут коливань анкера мінімальний. Радикально знижено тертя, що дозволило підвищити точність механізму та зменшити масу рухомих деталей.
Маятниковий регулятор	Заміна горизонтального коромисла (фолію) на вертикальний маятник. Базується на відкритому Галілеєм принципі ізохронності коливань.	Емпірично доведено, що час одного розмаху маятника залежить виключно від його довжини, а не від маси чи кута відхилення. Це дало

		механіці ідеальний, стабільний еталон часу.
Зубчасті передачі	Трансмісія від барабана до стрілок. Ранні залізні колеса мали трикутні або прямокутні зубці, що викликало сильне ковзання зуба по зубу.	Перехід до емпіричного створення епіциклоїдального профілю зуба . Такий профіль забезпечував плавне перекочування зубців без тертя, зберігаючи постійне передаточне відношення.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історичні контексти, що ілюструють складнощі переходу від грубого ковальства до точної механіки та проблеми експлуатації перших вимірювальних приладів.

Документ 1: Зі скарги магістрату міста Львова на майстра-годинникаря (XVI ст.)

«...Міський дзигар [баштовий годинник], на який з міської скарбниці було витрачено багато срібла, знову стоїть. Майстер викував колеса із заліза грубо, зуби на них чіпляються один за одного, від чого весь механізм дрижить і гуркоче, як віз на камінні. А гирі довелося повісити такі важкі, що прогинаються дубові балки вежі. І попри все це, годинник взимку відстає, а влітку поспішає, через що ремісничі цехи не знають, коли відчиняти крамниці, і виникають сварки на ринку».

Документ 2: Емпіричне спостереження Християна Гюйгенса щодо маятника (XVII ст.)

«Я помітив, що якщо підвісити на мотузках різної довжини свинцеві кулі, то та куля, що висить на довшій мотузці, ходить туди-сюди повільніше. Але що найдивовижніше: коли розмах кулі стає зовсім коротким, вона витрачає на цей рух точно такий самий час, як і тоді, коли розгойдувалася дуже широко. Ця постійність ходу дозволила мені приєднати таку кулю до коліс годинника, змусивши їх підкорятися цьому незмінному природному ритму».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Матеріалознавчий та трибологічний аспект:** Проаналізуйте скаргу магістрату (Документ 1). Чому використання грубого заліза та неправильної форми зубців змусило майстра вішати надзвичайно важкі гирі? Куди витрачалася колосальна потенційна енергія цих гир, якщо не на обертання стрілок?
- Термодинамічний аспект:** Чому залізний годинник взимку відставав, а влітку поспішав? Яке фізичне явище (без використання формул лінійного розширення) не врахував середньовічний коваль під час виготовлення металевго балансира чи маятника?
- Кінематичний аспект:** Опишіть значення емпіричного відкриття ізохронності маятника (Документ 2). Чому здатність маятника зберігати однаковий час повного коливання незалежно від амплітуди (ширини розмаху) стала критично важливою для подолання проблеми нерівномірного тертя в зубчастих колесах годинника?

Еталон відповіді викладача:

- Неправильний, кустарний профіль зубців призводив до того, що вони не перекочувалися, а вклинювалися і терлися один об одного. Виникало колосальне тертя ковзання, яке «з'їдало» майже всю корисну енергію системи. Щоб подолати цей внутрішній опір механізму, майстер мусив нескінченно збільшувати масу гир, щоб збільшити рушійну силу. Уся енергія гир перетворювалася на тепло, вібрацію та руйнування металу, а не на плавний рух.
- Причина полягає у термічному розширенні та стисканні металів. Влітку, від спеки, металевий стрижень балансира або маятника подовжувався. Збільшення довжини маятника природним чином уповільнює ритм його коливань — годинник починав відставати (хоча в документі вказано навпаки, що свідчить про наявність загуслого мастила або інших температурних факторів, але головний вплив на регулятор — геометричний). Взимку метал стискався, маятник ставав коротшим, і годинник починав

поспішати. Пізніше інженери розв'яжуть цю проблему створенням компенсаційних маятників із різних металів.

3. У реальному механізмі тертя в зубчастих передачах постійно змінюється через пил, згущення мастила або знос. Через це імпульс сили, що доходить до регулятора, ніколи не буває ідеально рівним. Маятник, маючи властивість ізохронності, ігнорує ці коливання сили: якщо зубчасте колесо штовхне його сильніше, він відхилиться ширше, але повернеться назад за той самий незмінний час. Маятник став «абсолютним диктатором» ритму, підпорядкувавши собі всі вади колісної передачі.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Кінематична криза: Проблема шпіндельного спуску) Ситуація: Ви — міський годинникар XVII століття. Ваша ратуша має старовинний годинник із традиційним шпіндельним спуском (коронним колесом та вертикальним валом із двома палетами). Магістрат скаржиться, що механізм дуже швидко зношується, потребує постійного ремонту і гучно стукає. Ви спостерігаєте за роботою і бачите головний дефект кінематики: щоразу, коли лопатка зупиняє зуб коронного колеса, все колесо і вся зубчаста передача аж до гирі змушені на долю секунди прокрутитися у зворотному напрямку, долаючи шалений опір. Це так званий ефект "відкоту". **Завдання:** Спираючись на логіку механіки рухів в одній площині, запропонуйте кардинальну зміну конструкції спускового механізму. Як позбутися ефекту зворотного ходу важких коліс і зробити так, щоб кінетична енергія передавалася регулятору плавно? **Очікуване рішення:** Інженер має відмовитися від просторової передачі (де коронне колесо розташоване під прямим кутом до осі балансира) і перейти до плоского механізму. Рішення полягає у винаході **анкерного (якірного) спуску**. Ходове колесо робиться плоским. Над ним на осі встановлюється анкерна вилка. Зубці колеса більше не б'ють прямолінійно в палети. Палети мають спеціально скошену площину (імпульсну площину). Коли зуб колеса торкається палети, він не зупиняється миттєво з відкотом, а плавно ковзає по цій похилій площині, м'яко відштовхуючи анкерну вилку вбік і продовжуючи свій рух уперед. Це радикально мінімізує тертя, усуває ударні зворотні навантаження на зубчасту передачу і робить хід годинника тихим та довговічним.

Кейс 2 (Модернізація виробництва: Від напилка до верстата) Ситуація: У зв'язку зі створенням маятникових годинників, вимоги до точності виготовлення деталей багаторазово зросли. Раніше колеса викували ковалі, а зубці випилювали вручну тригранними напилками на око. Тепер, якщо крок між зубцями відрізняється хоча б на товщину волосини, анкерний спуск заклинює. Ваша годинникова майстерня отримує багато замовлень, але вручну виготовити ідеально кругле колесо з 60 рівними епіциклоїдальними зубцями забирає тижні виснажливої праці, і часто деталь йде у брак через помилку ока майстра. **Завдання:** Як піонер точної механіки, застосуйте інженерний підхід для повної відмови від ручного випилювання. Запропонуйте кінематичну схему механічного пристрою (прототипу верстата), який дозволить нарізати зубці на латунному диску з абсолютною математичною точністю, виключивши помилку людського ока. **Очікуване рішення:** Майстер повинен розробити перший в історії **зубофрезерний пристрій із ділильним диском**. Механіка пристрою: Гола латунна заготовка колеса жорстко затискається на нерухомій осі. Поруч встановлюється обертова металева фреза (різець), профіль якої ідеально повторює впадину між майбутніми зубцями. Фреза приводиться в рух лучковим приводом і насувається на заготовку, прорізаючи ідеальний паз. Головний секрет точності — **ділильний диск**. На осі із заготовкою кріпиться великий латунний диск, на якому заздалегідь, за допомогою циркуля та геометрії, нанесені концентричні кола з ідеально точними отворами (наприклад, коло з 60 отворами). Після прорізання одного паза майстер витягує стопорний штифт, повертає ділильний диск рівно на один отвір і знову фіксує його. Цей механічний алгоритм жорстко гарантує, що наступний зуб буде нарізаний з математично бездоганим кроком. Це був початок ери прецизійного верстатобудування та стандартизації.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *точна механіка, спусковий механізм (ескапмент), анкерна вилка, ізохронність коливань, маятник, епіциклоїдальний профіль, ділильний диск.*

- Описати у вигляді таблиці 3 ключові відмінності між роботою шпindelного спуску з фолію та анкерного спуску з маятником з точки зору зменшення тертя.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Перші годинники швидко зрозуміли, що залізо — не найкращий матеріал для точних вимірювальних пристроїв. Відбувся масовий перехід до використання латуні для зубчастих коліс та загартованої сталі для осей і малих шестерень (трибів).

- **Завдання:** Використовуючи знання з будівельного матеріалознавства та фізики тертя, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть інженерну логіку використання тертя в парі "сталь по латуні". Чому цей союз металів має значно менший коефіцієнт тертя і менше зношується, ніж пара "залізо по залізу"? Як корозійна стійкість латуні впливала на довговічність і стабільність мікромеханізмів?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від ковальського молота до зубофрезерного верстата: як боротьба за еталон часу народила точну інженерію».
2. «Ізохронність маятника: як один фізичний принцип подолав інженерні недоліки найскладніших колісних трансмісій».
3. «Етика точності: чому мікронна похибка в зубчастій передачі годинника мала більші соціальні наслідки, ніж обвал стіни».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології мікромеханіки та розуміння фізичних процесів (тертя, кінетична енергія, коливання) під час аналізу еволюції годинників — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових кінематичних та матеріалознавчих кейсів (без використання сучасних формул) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досвід створення перших прецизійних приладів на загальну філософію сучасного приладобудування у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 8: Механічні властивості деревини та металу в ранньомодерному транспорті

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-механічного аналізу, вивчення матеріалознавства доіндустріальної епохи та фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Здійснити глибинний аналіз транспортної механіки козацької доби на прикладі класичного великовантажного засобу — чумацької мажі. Розкрити емпіричне розуміння стародавніми стельмахами механічних властивостей різних порід деревини та точкового застосування металу для створення композитної конструкції, здатної витримувати колосальні навантаження в екстремальних умовах бездоріжжя.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички вербального і логічного аналізу просторової статистики твердого тіла, трибології та опору матеріалів. Навчити описувати розподіл мас, згинальні моменти та механізми гасіння динамічних ударів виключно через історичний контекст та інженерну доцільність конструкції, без використання сучасного математичного апарату.
3. **Соціально-адаптивна:** Продемонструвати вплив надійної транспортної логістики на розбудову торговельних шляхів, урбанізацію та економічну незалежність українських земель. Виховати повагу до вітчизняної інженерної спадщини, показавши, що оптимальні інженерні рішення часто криються не в ускладненні механізму, а в глибокому розумінні природи матеріалів та їхньої синергії.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Виклики далекобійної комерційної логістики: транспортування надважких вантажів без ресорної підвіски.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Емпіричне матеріалознавство раннього модерну. Розподіл порід деревини за типами механічних напружень (стиск, згин, зріз). Кінематика колеса мажі.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історико-етнографічними першоджерелами. Аналіз чумацького промислу крізь призму проблеми тертя, змащення вузлів (трибології) та жорсткості конструкцій.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерно-статичних задач (боротьба з боковими навантаженнями на спиці, оптимізація профілю осі під впливом згинальних моментів).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-МЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Сьогодні ми розглядаємо один із найдосконаліших зразків композитної транспортної інженерії доіндустріальної епохи — чумацьку мажу. Перед майстрами-стельмахами стояло надзвичайно складне завдання: створити транспортний засіб, здатний перевозити близько однієї тонни вантажу (сіль, рибу) тисячами кілометрів степових шляхів, поцяткованих глибокими коліями та камінням. При цьому мажа не мала жодної металевої ресори чи амортизатора. Якби її зібрали на жорстких залізних болтах, вона б розсипалася від втоми матеріалу через постійні високочастотні вібрації за перші сто кілометрів. Секрет полягав у геніальній біоміметиці: використанні різних порід дерева залежно від того, як саме деталь навантажується (на стиск чи на згин), та застосуванні гнучких шкіряних з'єднань замість заліза. Козацький віз був не просто возом, він був цілісною інженерною системою, яка "дихала" і поглинала удари всім своїм корпусом».

Таблиця 1. Інженерно-матеріалознавчий аналіз елементів чумацької мажі

Деталь мажі	Матеріал та його механічні властивості	Інженерна логіка застосування
Вісь та Маточина (Центральна втулка колеса)	Дуб. Надзвичайно висока міцність на стиск, твердість та стійкість до зминання. Стійкість до біологічного гниття.	Вісь працює як балка, що несе всю масу вантажу, а маточина передає це навантаження на спиці. Тільки дуб міг витримати колосальний статичний тиск без руйнування кристалічної структури волокон.
Спиці та Обідтя колеса	Ясен або В'яз. Висока пружність, здатність гнутися під навантаженням без крихкого зламу, чудова опірність ударним навантаженням.	Спиця під час руху працює не лише на стиск, а й на поздовжній згин через удари об каміння. Пружний ясен діяв як мікроамортизатор, поглинаючи кінетичну енергію ударів і запобігаючи розколюванню колеса.
Кузов (Днище та борти)	Липа або Сосна. Легкість, достатня міцність при розподіленому площинному навантаженні.	Кузов не несе концентрованих навантажень. Використання легких порід дозволило радикально зменшити "мертву масу" самого воза, збільшивши корисне (комерційне) навантаження на тяглових волів.
Вузли кріплення (Безцвяхова збірка)	Дерев'яні шипи та сиром'ятна шкіра (гужви). Еластичність, здатність до розтягування та повернення у вихідну форму.	Відмова від жорсткого металевого кріплення (болтів, скоб). Шкіряні з'єднання діяли як сучасні сайлентблоки: вони дозволяли рамі воза мати просторову гнучкість, гасячи вібрації та оберігаючи деревину від розтріскування.

Шинування колеса	Коване залізо. Висока зносостійкість, здатність до лінійного розширення при нагріванні та потужного стягування при охолодженні.	Залізна шина монтувалася на обід у розпеченому стані. Охолоджуючись, метал з колосальною силою стягував усі дерев'яні деталі колеса (спиці в маточину), створюючи жорстку, монолітну конструкцію та захищаючи дерево від стирання об ґрунт.
------------------	---	---

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте етнографічні та історичні свідчення про експлуатацію гужового транспорту в ранньомодерну добу. Визначте, як стародавні майстри розв'язували проблеми тертя та динамічної втоми конструкцій.

Документ 1: 3 описів чумацького промислу (XVIII ст.)

«Чумацька мажа будувалася зовсім без заліза, окрім хіба що шин на колесах. Стельмахи складали її так майстерно, що вона гнулася на степових вибоїнах, як жива, скрипіла, але ніколи не розсипалася. А щоб вози могли йти тижнями без зупинки і осі не загорялися від тертя, під мажею завжди висіла мазниця з дьогтем. Мазати осі треба було густо і часто, бо якщо дьоготь висохне, колесо швидко "з'їсть" дубову вісь, і віз впаде посеред безводного степу».

Документ 2: Спостереження за конструкцією степового колеса

«Колеса для важких возів майстри ніколи не робили плоскими, як тарілка. Вони завжди мали вигляд пологої миски: маточина виступала вперед, а спиці стояли під кутом назовні. Крім того, кінці самої дерев'яної осі, на які насаджувалося колесо, були злегка нахилені донизу».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Матеріалознавчий аспект (Гнучкість конструкції):** Проаналізуйте Документ 1. Чому жорстка фіксація (наприклад, металевими цвяхами та кутниками) важкого транспортного засобу, що рухається без ресор нерівною дорогою, призвела б до його швидкого руйнування? Яке фізичне явище попереджала гнучкість дерев'яно-шкіряної збірки?
- Трибологічний аспект:** Опишіть фізику процесу тертя між дерев'яною віссю та дерев'яною маточиною. Чому під навантаженням в 1 тону тертя ковзання без мастила могло призвести до загоряння? Яку функцію (окрім зменшення коефіцієнта тертя) виконував густий березовий або сосновий дьоготь у цьому вузлі?
- Кінематичний аспект (Конусоподібність):** Аналізуючи Документ 2, спробуйте пояснити емпіричну інженерну логіку нахилу спиць (конусоподібності) та нахилу кінців осі (розвалу). Що відбувається з геометрією такого колеса, коли віз найїжджає на нерівність або хилиться набік?

Еталон відповіді викладача:

- Жорсткі з'єднання (металеві скоби) в умовах сильних вібрацій працюють як концентратори напружень. Вібрація розхитує метал, який починає розбивати і кришити деревину навколо себе. Накопичення цих мікропошкоджень призводить до втоми матеріалу і раптового крихкого зламу. Гнучкість мажі (де деталі скріплювалися розпареною шкірою, яка висихала і мертво стягувала вузли, залишаючи їм міліметри для маневру) дозволяла конструкції деформуватися в межах пружності, гасячи ударні хвилі.
- Тертя ковзання дерева по дереву під колосальним статичним тиском генерує величезну кількість теплової енергії. Деревина є поганим провідником тепла, тому воно концентрується в точці контакту, що швидко призводить до обуглювання і спалаху. Дьоготь (густа смолиста фракція) створював необхідний шар режиму рідинного (граничного) тертя, не видавлювався з-під осі під великою вагою, а також працював як охолоджувач (відводив тепло) і захищав деревину від вологи.
- Конусоподібна форма колеса (dishing) у поєднанні з нахилом осі вниз (camber) — це геніальне розв'язання проблеми поперечних навантажень. Коли нахилене колесо опирається на землю, його найнижча спиця (яка в цей момент приймає на себе всю вагу вантажу) стає ідеально перпендикулярно до землі. Вона працює виключно на стиск (найміцніший стан деревини). Якби колесо було плоским, найнижча спиця стояла б під

кутом до вектора сили тяжіння, і її б просто виламало на згин при першому ж боковому крені воза на поганій дорозі.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Опір матеріалів: Проектування дерев'яної осі)

Ситуація: Ви — майстер-стельмах козацької доби. До вас звернувся купець, у якого під час подорожі зламалася вісь на важкій мажі. Ви оглядаєте зламану деталь і бачите, що вісь (виточена з суцільної дубової колоди) була абсолютно рівною і мала однаковий діаметр по всій своїй довжині. Злам відбувся рівно посередині осі (між двома колесами).

Завдання: Спираючись на розуміння статички та розподілу навантажень (згинальних моментів), поясніть купцеві, чому попередня вісь була спроектована неправильно. Запропонуйте новий, оптимізований профіль (геометрію) осі, який дозволить уникнути зламу по центру, зберігши при цьому оптимальну загальну вагу деталі.

Очікуване рішення: Дерев'яні вісь мажі працює як балка на двох шарнірних опорах (колесах), на яку тисне рівномірно розподілене навантаження від кузова з вантажем. Стародавні майстри емпірично розуміли закони статички: максимальне напруження на згин виникає саме в геометричному центрі цієї балки (там найбільший згинальний момент), тоді як на кінцях осі біля коліс це напруження мінімальне. Рівна вісь нераціональна — вона занадто слабка в центрі. Інженерне рішення: необхідно виточити вісь складного профілю, яка візуально повторюватиме епюру згинальних моментів. Вісь має бути надзвичайно масивною і товстою посередині, і поступово звужуватися до країв (до цапф, на які насаджуються маточини коліс). Цей дизайн забезпечує максимальну міцність конструкції саме там, де це фізично необхідно, без надмірної перевитрати матеріалу на краях. Це історичний прообраз рівномісних балок сучасного машинобудування.

Кейс 2 (Термічна напруга: Технологія гарячого шинування)

Ситуація: Для захисту дерев'яного колеса чумацької мажі від стирання об степовий ґрунт необхідно надіти на його обід суцільну залізну смугу (шину). Проблема полягає в тому, що колесо має ідеальну круглу форму, і якщо просто прибити залізо цвяхами, воно швидко розхитається від вібрації і відпаде. Крім того, саме колесо зібране зі спиць і колодок, які потребують жорсткого зовнішнього стиснення, щоб не розсипатися.

Завдання: Як коваль ранньомодерної доби, опишіть технологічний процес закріплення залізної шини, який дозволить намертво стягнути всі дерев'яні елементи колеса в єдиний моноліт без використання клею чи цвяхів. Яке фундаментальне фізичне явище лежить в основі цього процесу?

Очікуване рішення: Технологія базується на використанні термічного розширення і стискання металів. Алгоритм дій (гаряче шинування):

1. Коваль виковує замкнений залізний обруч (шину), внутрішній діаметр якого свідомо робиться трохи меншим за зовнішній діаметр дерев'яного колеса.
2. Шину рівномірно розігрівають у горні або на відкритому вогні до червоного розжарення. Під дією високої температури кристалічна решітка металу розширюється, діаметр обруча збільшується.
3. У розширеному стані шину швидко накидають на дерев'яне колесо.
4. Щоб дерево не загорілося, колесо негайно поливають холодною водою. Охолоджуючись, залізо стрімко повертається до своїх початкових розмірів. Зменшуючись у діаметрі, шина з колосальним, непереборним концентричним тиском стягує обіддя і спиці до центру маточини, фіксуючи всю конструкцію намертво. Це блискуче емпіричне застосування законів термодинаміки та пружних напружень в інженерній практиці.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *мажа, маточина, цапфа, сайлентблок (емпіричний аналог), трибологія, термічне розширення, згинальний момент, конусоподібність коліс*.
- Описати у вигляді таблиці 3 механічні відмінності між використанням дуба та ясеня в конструкції транспортного засобу.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Стародавні майстри використовували сиром'ятну (недублену) шкіру для створення гнучких з'єднань між дерев'яними деталями воза.

- **Завдання:** Використовуючи знання про фізичні властивості колагенових волокон, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть технологію збирання деталей за допомогою мокрої (розпареної) сиром'ятної шкіри. Яке фізичне перетворення відбувається зі шкірою в процесі її висихання, і чому це дозволяло створювати з'єднання, що за силою стягування могли конкурувати з металевими хомутами, але при цьому зберігали мікроскопічну еластичність?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Темі на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від козацької мажі до сучасної автомеханіки: як емпірична розстановка спиць випередила математичну теорію розвалу коліс».
2. «Композитні технології минулого: синергія дерева, заліза та шкіри в екстремальних умовах бездоріжжя».
3. «Транспортна логістика як рушій цивілізації: інженерна надійність мажі як фактор розбудови міст і торговельних магістралей України».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та розуміння фізико-механічних властивостей різних порід деревини під час аналізу історичних об'єктів — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна обґрунтованість під час розв'язання фахових статичних, трибологічних та термодинамічних кейсів транспортної механіки — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досвід створення композитних доіндустріальних конструкцій на загальну філософію сучасного машинобудування у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 9: Зміна технологічного укладу та розвиток важкого машинобудування на Півдні та Сході України

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-кінематичного аналізу, вивчення емпіричної термодинаміки та фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Проаналізувати фундаментальну зміну технологічного укладу в ХІХ столітті — перехід від використання природних джерел енергії (вітер, падаюча вода) та ручної праці до машинної ери на базі теплових двигунів. Дослідити етапи впровадження парових машин у промисловість Півдня та Сходу України, що стало каталізатором бурхливого розвитку металургії, вуглевидобування та важкого машинобудування в регіоні.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички вербального і логічного аналізу термодинамічних процесів та складних просторових важільних систем. Навчити описувати роботу кривошипно-шатунного механізму (КШМ), розв'язання проблеми «мертвих точок» та функціонування паророзподільних систем виключно через інженерну доцільність, без використання сучасного диференціального математичного апарату.
3. **Соціально-адаптивна:** Продемонструвати, як винайдення універсального автономного двигуна кардинально змінило географію виробництва, створивши нові індустріальні центри (Донбас, Придніпров'я) та сформувавши новий клас технічної інтелігенції. Використати цей досвід швидкого індустріального масштабування як історичний взірєць для розуміння викликів та можливостей масштабної повоєнної відбудови промислового потенціалу українських регіонів.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Парова машина як перший універсальний первинний двигун, незалежний від природного ландшафту.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія машинної ери. Емпірична термодинаміка розширення пари. Кінематика кривошипно-шатунного механізму, акумуляція енергії маховиком та поява важкого машинобудування.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історичними першоджерелами. Аналіз технологічної інтеграції (вугілля-метал-машина) на прикладі перших металургійних та машинобудівних заводів Півдня.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач (подолання кінематичних криз у КШМ, забезпечення експлуатаційної безпеки парових котлів високого тиску).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «До XIX століття інженер був прив'язаний до географії. Найпотужніша мануфактура чи рудня могла працювати лише там, де був достатній перепад висот для водяного колеса. Винайдення парової машини розірвало цей кайдани природи. Людина навчилася спалювати хімічну енергію викопного палива (вугілля), перетворювати її на теплову енергію стисненої пари, а потім — на механічну роботу. Ця термодинамічна революція дозволила будувати заводи безпосередньо біля родовищ корисних копалин. Так дикі степи Півдня та Сходу України за кілька десятиліть перетворилися на найпотужніший індустріальний хаб Європи. Але застосування сили пари вимагало вирішення колосальних механічних проблем: як перетворити лінійний рух поршня на обертання заводських валів? Розробка кривошипно-шатунного механізму (КШМ) стала відповіддю на цей виклик, породивши сучасну динаміку машин і механізмів».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз систем парового машинобудування

Вузол / Машина	Емпірична механічна та термодинамічна сутність	Вплив на промисловість України
Паровий котел та Циліндр	Перетворення теплової енергії на механічну. Вода закипає у замкненому просторі, пара під величезним тиском розширюється і штовхає металевий поршень усередині ідеально розточеного циліндра.	Вимагало революції в матеріалознавстві та металургії: створення міцного "котельного заліза", здатного витримувати розривні напруження від тиску пари, та прецизійної обробки металу для герметичності.
Кривошипно-шатунний механізм (КШМ)	Просторова важільна система. Зворотно-поступальний рух поршня через шток і шатун передається на кривошип, який здійснює обертальний рух.	Дозволив застосувати парову машину для обертання прокатних станів, фабричних верстатів та коліс локомотивів. Перетворив парову машину на універсальний привод.
Маховик (Акумулятор енергії)	Масивне чавунне колесо на головному валу. Розв'язує проблему «мертвих точок» — моментів, коли поршень, шатун і кривошип шикуються в одну лінію і зусилля не створює крутного моменту.	Завдяки своїй величезній інерції (опору зміні швидкості), маховик накопичував енергію під час робочого ходу і «протягував» механізм через мертві точки, забезпечуючи плавне обертання цехових трансмісій.
Паровий баланси́рний насос (Шахтний водовідлив)	Парова машина прямої дії, де шток поршня через гігантське коромисло (баланси́р) підіймав важку помпову штангу з дна шахти.	Врятував вугільну промисловість Донбасу. Дозволив відкачувати мільйони літрів підземних вод, давши можливість шахтарям

		опускатися на глибокі, раніше недоступні горизонти.
Паровий молот	Механізм, у якому пара під тиском піднімала масивну металеву бабу (накопичення потенційної енергії), а потім додатково штовхала її вниз, додаючи свою силу до сили тяжіння.	Дозволив ковати гігантські сталеві осі для локомотивів і вали для пароплавів на металургійних заводах (Юзівка, Катеринослав), розпочавши еру важкого машинобудування.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історичні контексти створення перших індустріальних гігантів на Півдні та Сході України. Визначте інженерну логіку технологічної інтеграції різних галузей.

Документ 1: Звіт гірничого інженера про стан заводів на Донбасі (кінець XIX ст.)

«Завод Джона Юза, що розкинувся в Кальміуському степу, являє собою диво механічного поєднання. Вугілля з навколишніх копалень подається безпосередньо до доменних печей. Але найголовніше — це парове серце заводу. Колосальні парові повітродувки вдень і вночі нагнітають кисень у печі, забезпечуючи жар, здатний плавити руду. Тут же, у сусідніх цехах, стоять токарні верстати та парові молоти, що обробляють вилиту сталь, перетворюючи її на рейки, труби та нові парові котли для розширення самого ж заводу. Усе приводиться в рух ремінними передачами від центральних парових машин».

Документ 2: Опис шахтного парового підйомника (з технічного довідника Катеринославської залізниці)

«Безпека гірників повністю лежить на надійності підйомальної машини. З глибокого ствола шахти щохвилини піднімаються кліті з вугіллям або людьми. Машиніст керує двоциліндровою паровою лебідкою. За допомогою складного кулісного механізму, він одним рухом важеля перекидає золотник, змінюючи хід пари, і змушує багатотонну машину миттєво обертатися у зворотному напрямку, зупиняючи кліть рівно на рівні землі з точністю до дюйма».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Логістично-енергетичний аспект:** Аналізуючи Документ 1, поясніть явище технологічної інтеграції (синергії) на заводах Півдня та Сходу України. Як використання парових повітродувок (замість ручних міхів) у металургії створило замкнений цикл виробництва "вугілля - сталь - машини"?
- Кінематичний аспект:** У Документі 2 згадується здатність машиніста миттєво змінювати напрямок обертання масивної парової машини. Опишіть емпіричну логіку золотникового паророзподілу. Як зміна каналу, куди подається пара (зверху або знизу поршня), дозволяла здійснювати реверс (задній хід) без застосування складної зубчастої коробки передач?
- Аспект безпеки (Етика інженера):** Шахтний підйомник утримував життя десятків шахтарів на одному сталевому канаті. Які механічні запобіжники (наприклад, гальмові колодки, що стискають вал лебідки) повинен був передбачити інженер на випадок розриву паропроводу чи поломки кривошипа, спираючись на базове розуміння сили тертя?

Еталон відповіді викладача:

- До машинної ери масштаб металургії обмежувався м'язовою силою, здатною нагнітати повітря в піч. Парова машина, що працювала на місцевому вугіллі, дозволила подавати безперервний потік кисню під високим тиском. Це підвищило температуру плавлення, дозволивши масово випускати міцну сталь. З цієї сталі на місці будували нові парові машини та шахтне обладнання, що дозволяло видобувати ще більше вугілля. Ця інженерна замкненість циклу стала причиною вибухового економічного зростання Донбасу.
- Золотник — це спеціальний клапан (коробка), що ковзає над отворами в циліндрі. Він діє як механічний маршрутизатор. Якщо він відкриває лівий канал, пара тисне на поршень зліва, і механізм крутиться вперед. Машиніст, пересунувши кулісу (важіль),

зсуває золотник так, що свіжа пара раптово подається в правий канал, створюючи протитиск і змушуючи поршень рухатися у зворотному напрямку. Це пряме і безредукторне керування напрямком обертання було унікальною перевагою парових машин.

3. Експлуатаційна безпека вимагала подвійного резервування. Інженери використовували стрічкові або колодкові гальма, які працювали за принципом тертя ковзання. Масивна дерев'яна або чавунна колодка притискалася до маховика підйомника. Часто ці гальма проєктувалися як "нормально закриті" — вони утримувалися у затиснутому стані важким вантажем, а машиніст за допомогою пари або важеля мусив відтягувати їх, щоб дозволити рух. У разі будь-якої аварії (втрати тиску), вантаж падав і гальма автоматично мертво блокували кліть від падіння.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Кінематична криза: Подолання «мертвої точки»)

Ситуація: Ви — інженер-механік на новозбудованому машинобудівному заводі в Катеринославі (сучасний Дніпро). У вашому цеху змонтовано велику одноциліндрову парову машину для приводу лінії токарних верстатів. Наприкінці зміни машину зупинили. Зранку машиніст відкриває паровий вентиль на повну потужність, пара з ревом надходить у циліндр, поршень знаходиться під колосальним тиском, але маховик не обертається. Увесь механізм заклинило. Машиніст у паніці, боїться розриву циліндра.

Завдання: Спираючись на кінематику кривошипно-шатунного механізму, поставте "діагноз" цій зупинці. Що сталося з геометрією важелів? Опишіть алгоритм ваших фізичних дій для безпечного запуску машини без її пошкодження.

Очікуване рішення: Діагноз — машина зупинилася в «мертвій точці». Це геометричне положення (крайня ліва або крайня права точка ходу поршня), коли вісь штока поршня, вісь шатуна і центр кривошипа шикуються в одну ідеальну пряму лінію. З точки зору статyki, як би сильно пара не тиснула на поршень уздовж цієї лінії, плече сили дорівнює нулю, тому обертальний (крутний) момент не створюється; механізм працює лише на стиск власного металу.

Алгоритм порятунку: Інженер негайно наказує перекрити подачу пари (щоб скинути небезпечний статичний тиск). Далі кілька міцних робітників за допомогою ломів (важелів) вручну прокручують масивний маховик на кілька градусів уперед, виводячи кривошип із прямої лінії. З'являється кут (плече сили). Тепер, коли клапан відкрито знову, лінійний тиск пари створює крутний момент, машина рушає з місця, а далі інерція розкрученого маховика самостійно "пролітатиме" ці мертві точки.

Кейс 2 (Термодинамічна криза: Безпека парового котла)

Ситуація: Перехід від низького тиску пари до високого дозволив зробити парові машини Донбасу потужнішими та компактнішими. Однак це призвело до катастрофічних наслідків: парові котли (величезні клепані залізні бочки з водою, що підігріваються вугіллям) почали періодично вибухати з силою артилерійського снаряда, руйнуючи цілі цехи. Причина: кочегари часто засинали або навмисно закидали забагато вугілля, намагаючись дати більше тиску (потужності) на лінію, перевищуючи межу міцності заклепкових швів котла.

Завдання: Використовуючи базові знання зі статyki (баланс сил) та властивостей газів (тиск), розробіть повністю автономний механічний пристрій (запобіжник), який унеможливить вибух котла навіть за повної недбалості кочегара. Запропонований вами механізм не повинен мати жодної електрики чи складної кінематики.

Очікуване рішення: Інженер має розробити **механічний важільний запобіжний клапан**.

Будова: У верхній частині парового котла робиться отвір, який закривається металевим корком (клапаном). Зверху на цей корок тисне металевий стрижень, з'єднаний з горизонтальним важелем. На іншому, довгому кінці важеля підвішується важка чавунна гиря.

Фізика процесу: Система працює на строгому балансі двох протилежних сил. Знизу на клапан тисне гаряча пара, намагаючись його відкрити. Зверху клапан притискається важелем з гирею. Інженер розраховує плече важеля та масу гирі так, щоб сила їхнього притискання дорівнювала критичному безпечному тиску в котлі. Якщо кочегар перегріє котел, тиск пари перевищить вагу важеля. Клапан автоматично, долаючи тягіння гирі, підніметься вгору і з голосним

свистом випустить зайву пару в атмосферу. Як тільки тиск впаде до безпечної норми, тяжіння гирі знову закриє клапан. Це блискуче і безвідмовне втілення інженерної етики в залізі, що рятувало тисячі життів.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *термодинамічний цикл, кривошипно-шатунний механізм, мертва точка, махове колесо, золотниковий паророзподіл, запобіжний клапан, технологічна синергія*.
- Описати у вигляді таблиці 3 фундаментальні відмінності між водяним колесом та паровою машиною як первинними двигунами (з точки зору автономності, керованості та вимог до матеріалів).

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Перші парові котли виготовлялися з окремих залізних листів, з'єднаних між собою за допомогою заклепок. Процес клепа́ння часто здійснювався вручну в розпеченому стані.

- **Завдання:** Використовуючи знання з опору матеріалів та термічних процесів, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть інженерну логіку гарячого клепа́ння. Що відбувається із металевим стрижнем заклепки під час її остигання, і чому це термічне стискання було єдиним способом створити абсолютно герметичний шов, здатний утримувати пару під високим тиском без гумових чи силіконових ущільнювачів?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від лінійного до обертового: як кривошипно-шатунний механізм вирвав індустрію з географічного полону».
2. «Маховик промислової революції: роль інерції в подоланні механічних та технологічних криз машинобудування».
3. «Вугілля, пара і метал: інженерна синергія як фундамент економічної потужності міст-заводів Півдня та Сходу України».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та здатність вербально описувати складні термодинамічні та кінематичні перетворення (тиск, обертання, баланс сил) без сучасних математичних формул — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових мануфактурних кейсів (подолання мертвих точок, конструювання запобіжників) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досвід індустріалізації Півдня та Сходу України на завдання сучасної повоєнної розбудови важкого машинобудування у творчому есе — **30 балів**.

МЕТОДИЧНА РОЗРОБКА СЕМІНАРСЬКОГО ЗАНЯТТЯ

ТЕМА 10: Внесок українських вчених у розвиток теорії міцності та динаміки машин

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-наукового аналізу, вивчення еволюції інженерної освіти та фахового кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Проаналізувати переломний етап в історії техніки (кінець XIX — початок XX ст.) — перехід від емпіричного (ремісничого) конструювання до науково обґрунтованого проєктування механічних систем. Дослідити фундаментальний внесок вітчизняних наукових шкіл (Києва, Харкова, Львова) та видатних учених (Степана Тимошенка, Віктора Кирпичова) у зародження сучасного опору матеріалів, теорії пружності та динаміки машин.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички вербального і логічного аналізу складних механічних явищ (втома металу, втрата

стійкості, резонанс). Навчити описувати поведінку матеріалів під дією просторових, циклічних та динамічних навантажень виключно через фізико-інженерну сутність процесів, відмовившись від простого завчання формул на користь глибокого розуміння природи деформацій.

3. **Соціально-адаптивна:** Використати історичний приклад формування вітчизняної технічної еліти для виховання професійної гідності та громадянської відповідальності сучасного інженера. Довести, що інженерія — це не сліпе виконання інструкцій, а точна наука, де глибоке розуміння фізики рятує людські життя, запобігаючи катастрофам мостів, локомотивів та промислових цехів.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Вичерпання можливостей "інженерної інтуїції" в епоху високих швидкостей та колосальних мас.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Становлення науки про машини. Опір матеріалів як філософія міцності. Теорія згину балок, дослідження пружності, вібрацій та балансування роторів українськими вченими.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з першоджерелами. Аналіз наукових спогадів та підходів до інженерної освіти фундаторів вітчизняних політехнічних інститутів.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерно-дослідницьких задач (боротьба з втратою стійкості довгих стрижнів, подолання руйнівного резонансу у швидкохідних турбінах).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-НАУКОВИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Уявіть собі кінець XIX століття. Промислова революція розігнала людство до небувалих швидкостей. Паротяги важать десятки тонн і мчать по сталевих мостах, на електростанціях обертаються масивні турбіни. І раптом починаються катастрофи: мости, збудовані з величезним запасом міцності за старими ковальськими правилами, раптово обвалюються; сталеві осі вагонів розлітаються на друзки без видимих причин; фабричні труби тріскаються від вібрацій. Стало очевидним: реміснича інтуїція більше не працює. Метал під дією динаміки (руху) поводить себе зовсім інакше, ніж у стані спокою. Світ потребував нової науки. І саме українські політехнічні інститути (Києва, Харкова, Львова) стали тими інтелектуальними центрами, де народилася сучасна Теорія механізмів і машин (ТММ) та Опір матеріалів. Видатні вітчизняні вчені довели, що справжній інженер проектує не "на око", а на основі глибокого розуміння мікроструктури металу та природи хвильових деформацій».

Таблиця 1. Фундаментальний внесок українських наукових шкіл у прикладну механіку

Науковий напрям	Інженерно-фізична сутність проблеми	Досягнення вітчизняних учених (С. Тимошенко, В. Кирпичов та ін.)
Опір матеріалів (Теорія пружності)	Старі європейські теорії розраховували балку лише на простий згин, уявляючи її як ідеальну лінію. Проте реальні товсті сталеві балки під вагою поїзда деформувалися складніше.	Теорія балок Тимошенка. Видатний український вчений вперше врахував у розрахунках деформацію зсуву (перекосу) поперечних перерізів та інерцію їхнього обертання. Це зробило можливим безпечно проектування важких мостів та кораблів без надмірного потовщення металу.
Стійкість конструкцій	Інженери не розуміли, чому довга і тонка сталева колона, яка має витримувати 100 тонн ваги на стиск, раптово вигинається вбік і ламається вже при 10 тоннах.	Вітчизняні вчені розробили точні методи розрахунку пружної стійкості конструкцій (боротьба з так званім подовжнім згином). Це дозволило створювати легкі, але абсолютно надійні просторові ферми і каркаси

		будівель, попереджаючи їхнє раптове «схлопування».
Динаміка машин (Теорія коливань)	Швидке обертання незбалансованих мас (маховиків, кривошипів) створювало колосальні відцентрові сили. Ці сили генерували вібрації, що виривали верстати з фундаментів.	Розробка теорії пружних коливань та методів динамічного балансування роторів. Вчені довели, що кожна деталь є пружною системою, яка може впасти в резонанс.
Втома металів	Раптові, крихкі руйнування сталевих осей та шатунів при багаторазовому змінному навантаженні (навіть якщо це навантаження було вдесятеро меншим за границю міцності металу).	Започаткування системних лабораторних випробувань металу на втому у вітчизняних політехнічних інститутах. Вивчення впливу мікроподрипин (концентраторів напружень) на зародження і поширення прихованих тріщин під час експлуатації.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте уривки зі спогадів та лекцій видатних українських механіків. Визначте, як змінювалася філософія інженерного проєктування.

Документ 1: З публічних лекцій Віктора Кирпичова (першого ректора Харківського та Київського політехнічних інститутів)

«Мистецтво інженера полягає не в тому, щоб нагромадити гори заліза там, де можна обійтися його крихтою. Будь-який невіглас може збудувати міст, який витримає потяг, якщо витратить на нього у десять разів більше металу, ніж потрібно. Справжній інженер — це той, хто будує міст, який ледве витримає потяг, але витримає його завжди і з абсолютною гарантією. А для цього потрібне глибоке проникнення в сутність напружень, прихованих усередині твердого тіла, і розуміння того, що матеріал не мертвий — він пружно відповідає на кожен прикладений до нього силу».

Документ 2: З наукових мемуарів Степана Тимошенка (основоположника сучасної школи опору матеріалів)

«Коли ми почали досліджувати причини руйнування залізничних мостів під час проходження важких локомотивів, стало зрозуміло, що закони класичної статки тут безсилі. Удар колеса об стик рейок генерує хвилю напруження, яка мчить металом зі швидкістю звуку. Якщо ця хвиля зустрічає на своєму шляху різкий перехід діаметра осі або гострий кут заклепкового отвору, виникає місцеве перенапруження. І саме там, невидимо для ока, зароджується втома, яка згодом розірве найтовщу сталь».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

1. **Економіко-інженерний аспект:** Проаналізуйте тезу В. Кирпичова (Документ 1). Чому багаторазовий (сліпий) запас міцності конструкції (over-engineering) у XIX столітті став не просто економічно не вигідним, але й фізично небезпечним для великогабаритних споруд? Як зайва «мертва маса» металу впливає на власне навантаження конструкції?
2. **Динамічний аспект:** Опишіть логіку С. Тимошенка (Документ 2) щодо поширення хвиль напруження. Чому динамічний удар спричиняє руйнування у точках, які за статичними розрахунками були абсолютно безпечними?
3. **Філософія матеріалу:** Що мають на увазі вчені, називаючи концентратори напружень (різкі переходи діаметрів, отвори, подрипини) «ворогами інженера»? Як зміна форми деталі (плавні заокруглення замість прямих кутів) дозволяє боротися із втомою металу без зміни самого матеріалу?

Еталон відповіді викладача:

1. Бездумне нагромадження металу робить конструкцію (наприклад, міст) настільки важкою, що вона починає ламатися під власною ж вагою (мертвим навантаженням). Крім того, масивні жорсткі вузли не здатні деформуватися і гасити вібрації. Кирпичов стверджував, що ідеальна інженерія — це математичний оптимум: мінімум маси при гарантованій міцності, що досягається лише через точний розрахунок напруженого стану.
2. Статика розглядає сили як постійні величини, що рівномірно розподіляються по всьому тілу. Динамічний удар (як хвиля у воді) створює локальні сплески енергії. Якщо ця хвиля наштовхується на "перешкоду" у вигляді дефекту або різкої зміни форми, вся її енергія концентрується в одній мікроскопічній точці металу, розриваючи кристалічну решітку і започатковуючи тріщину.
3. Силкові лінії напружень у деталі поводять себе як потік води в трубі. Якщо переріз деталі змінюється плавно (галтель, великий радіус заокруглення), силкові лінії огинають перешкоду спокійно. Якщо ж є гострий внутрішній кут — силкові лінії скупчуються (концентруються) у цьому куті, створюючи напруження, що в кілька разів перевищує розрахункове. Згладжування форм — це найефективніший спосіб керування втомою матеріалів.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Опір матеріалів: Проблема втрати стійкості)

Ситуація: Ви — інженер-конструктор кінця XIX століття. Вам доручено спроектувати високі опорні колони для нового цеху. Залізо дороге, тому потрібно економити. Ваш помічник бере масивний сталевий прут квадратного суцільного перерізу і доводить, що за міцністю металу на стиск ця деталь легко витримає вагу даху. Але коли ви будете прототип, ця довга струнка колона під навантаженням не розчавлюється, а раптово вигинається дугою посередині і миттєво складається. Це класичне явище втрати пружної стійкості (поздовжній згин).

Завдання: Спираючись на засади опору матеріалів (геометричні характеристики перерізів), запропонуйте інноваційну зміну форми перерізу колони. Як, використовуючи точно таку саму (або навіть меншу) кількість металу, зробити так, щоб колона ніколи не вигиналася вбік?

Очікуване рішення: Інженер має відмовитися від суцільного монолітного перерізу (квадрата чи круга). Для опору згину міцність металу в центрі деталі (на нейтральній осі) майже не має значення, адже центральні шари не розтягуються і не стискаються. Увесь опір чинять крайні волокна.

Інженерне рішення: Необхідно здійснити **розподіл маси металу якнайдалі від центральної осі**. Суцільний прут треба перекувати на форму **двотавра (H-подібного профілю)** або пустотілої труби. Вся маса металу концентрується на периферії (у полицях двотавра), утворюючи максимальний опір вигину. При тій самій вазі і тій самій кількості сталі, двотаврова балка або труба в десятки разів жорсткіша за суцільний прут і гарантовано захищена від явища втрати стійкості. Цей принцип раціонального використання матеріалу є основою всієї сучасної будівельної та машинобудівної механіки.

Кейс 2 (Динаміка машин: Проблема руйнівного резонансу)

Ситуація: Завод виготовив першу партію швидкохідних парових турбін для електростанції. Вал турбіни масивний і збалансований. Під час пробного запуску, коли частота обертання поступово зростає, машина працює тихо. Раптом, при досягненні певної швидкості (наприклад, 1500 обертів на хвилину), вал починає дико вібрувати, турбіна підстрибує на фундаменті, підшипники перегріваються, лопатки торкаються корпусу. Здається, що машина зараз вибухне. Але варто оператору з переляку різко відкрити вентиль сильніше і підняти швидкість до 2000 обертів — вібрація раптово повністю зникає, і турбіна знову працює безшумно і гладко.

Завдання: Застосовуючи знання з теорії коливань динаміки машин, поставте "діагноз" цьому парадоксальному явищу. Що відбулося на швидкості 1500 обертів, і чому подальше збільшення швидкості врятувало турбіну? Опишіть інженерний алгоритм подолання цієї кризи.

Очікуване рішення: Діагноз — **руйнівний резонанс**. Будь-який пружний об'єкт (навіть товстий сталевий вал) має власну, природну частоту коливань. Під час розгону турбіни

неминучі мікроскопічні дисбаланси маси створюють відцентрові сили, що діють із певною частотою (частотою обертання вала).

Коли частота обертання машини збіглася з власною природною частотою коливань сталевго вала (1500 обертів), відбулося накладання хвиль — резонанс. Амплітуда вібрацій почала експоненціально зростати, що ледь не розірвало машину (ця точка називається *критичною швидкістю ротора*).

Підняття швидкості до 2000 обертів вивело машину із зони резонансу: частота збуджувальної сили (обертів) перестала збігатися з власною частотою вала, і система самостабілізувалася.

Інженерний алгоритм: Проєктувальник зобов'язаний заздалегідь, ще на кресленнях, визначити цю критичну швидкість. Робоча швидкість турбіни має бути спроектована так, щоб знаходитися або значно нижче, або значно вище за зону резонансу. А під час розгону машиніст зобов'язаний «проскакувати» цю небезпечну позначку максимально швидко, не затримуючись на ній, щоб вібрація не встигла накопичити руйнівну силу.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з фізико-інженерної перспективи терміни: *теорія пружності, втрата стійкості (поздовжній згин), втома матеріалів, концентратор напружень, руйнівний резонанс, критична швидкість ротора, двотавровий профіль*.
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові відмінності у поведінці сталевго деталі під дією статичного (постійного) навантаження та динамічного (циклічного, ударного) навантаження.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Явище втоми металу стало справжньою пандемією в епоху ранніх залізниць. Інженери київської та харківської шкіл масово досліджували так звану криву Велера (криву втоми).

- **Завдання:** Використовуючи доступну наукову літературу, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Опишіть емпіричну сутність поняття «границя витривалості». Поясніть логіку інженера: чому для осей локомотива, які обертаються мільйони разів, розрахунок на міцність ведеться не за межею текучості сталі (моментом, коли метал гнеться), а за значно нижчою границею витривалості? Яку роль у цьому відіграє процес "полірування" поверхні вала перед експлуатацією?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від ремісничої інтуїції до диференціалів міцності: як українські політехнічні інститути сформували нову філософію конструювання».
2. «Приборкання резонансу: як розуміння коливальної природи металу дозволило людству перейти до надшвидких машин».
3. «Вороги всередині сталі: боротьба інженерів із концентраторами напружень та втомою матеріалів в епоху індустріалізації».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та розуміння фізичних процесів (напруження, пружність, коливання) під час аналізу еволюції конструювання — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових динамічних та матеріалознавчих кейсів (боротьба з втратою стійкості та резонансом без застосування сучасних формул) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати внесок вітчизняних наукових шкіл на загальні принципи відповідального інженерного проєктування у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 11: Еволюція ґрунтообробної техніки: від простої кінематики до складних агрегатів

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-кінематичного аналізу, вивчення індустріальної стандартизації та фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Дослідити епоху масового впровадження сільськогосподарської техніки (кінець XIX — початок XX ст.) на прикладі діяльності вітчизняних машинобудівних гігантів, зокрема заводу братів Ельворті. Проаналізувати еволюцію аграрних машин від пасивних знарядь до складних кінематичних агрегатів, які перетворювали обертання ходових коліс на точні дозовані або зворотно-поступальні рухи робочих органів.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички вербального аналізу складних просторових і плоских механізмів (кривошипно-повзункових, кулачкових, зубчастих передач). Навчити розуміти інженерну специфіку конструювання техніки, що працює не в стерильних цехових умовах, а в екстремально нестабільному, абразивному та ударному середовищі ґрунту, без використання сучасного математичного апарату.
3. **Соціально-адаптивна:** Продемонструвати, як механізація аграрного сектору змінила макроекономіку, вивільнивши колосальні людські ресурси для індустріалізації міст. Виховати розуміння того, що впровадження стандартизації та принципу взаємозамінності деталей стало ключовою соціальною технологією, яка зробила ремонт техніки масовим і доступним, підвищивши продуктивність праці цілої нації.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Ґрунт як найскладніше інженерне середовище (неоднорідність, абразивність, приховані перешкоди).
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія поля. Кінематика рядової сівалки та кривошипно-повзунковий механізм жатки. Перехід від кустарного припасування до масової взаємозамінності деталей на заводах Ельворті.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історичними технічними каталогами. Аналіз впливу матеріалознавства (від чавуну до термічно обробленої сталі) на міцність аграрних машин.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач (захист рами від пікових динамічних ударів, боротьба з високочастотними вібраціями різальних апаратів).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Сільськогосподарське машинобудування кінця XIX століття — це унікальна галузь прикладної механіки. На фабриці верстат стоїть на міцному бетонному фундаменті, працюючи в контрольованому середовищі. Натомість аграрна машина рухається горбистим полем, піднімаючи хмари абразивного пилу, і її робочі органи постійно натрапляють на коріння чи каміння. Перед інженерами таких гігантів, як завод Ельворті у Єлісаветграді (сучасний Кропивницький), стояло завдання: створити механізми високої точності (наприклад, для дозування насіння), які б одночасно мали колосальну стійкість до вібрацій та ударів. Вирішенням стало геніальне використання ходового колеса не просто як опори, а як ротора (джерела обертання), що відбирає енергію руху і передає її через складні зубчасті та важільні системи до робочих апаратів. Це перетворило кінну тягу на високотехнологічний механізований процес».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз ґрунтообробних та збиральних механізмів

Механізм / Машина	Кінематична сутність та принцип дії	Інженерне та агротехнічне значення
Котушковий висівний апарат (Кінна сівалка)	Обертання знімається з ходового (опорного) колеса воза і через систему зубчастих шестерень	Забезпечив абсолютну синхронізацію: що швидше йде кінь, то швидше обертається катушка.

	передається на довгий горизонтальний вал. На валу жорстко закріплені катушки з жолобками, що обертаються на дні бункера, захоплюючи суворо дозовану порцію насіння.	Завдяки цьому відстань між насіннями в ґрунті залишається незмінною незалежно від швидкості руху, що гарантувало рівномірність сходів.
Різальний апарат (Жатка / Снопов'язалка)	Плоский кривошипно-повзунковий механізм. Обертання ходового колеса через конічну зубчасту передачу розкручує ексцентрик. До ексцентрика приєднано довгий шатун, який тягне і штовхає сталеву ножову штабу з трикутними сегментами крізь нерухомі пальці.	Перетворення повільного обертання колеса на швидкий, високочастотний зворотно-поступальний рух ножа (принцип нескінченних ножиць). Дозволило механізувати найважчий етап жнив — зрізання стебел, замінивши десятки косарів.
Взаємозамінність деталей (Серійне виробництво)	Перехід від індивідуального виконання кожної деталі ковалем до масового лиття і штампування за суворими еталонними кресленнями (лекалами).	Справжня соціально-інженерна революція. Зламана в полі шестірня більше не вимагала тижнів роботи коваля. Селянин міг замовити нову деталь за каталогом, і вона ідеально ставала на своє місце. Це основа сучасної ремонтпридатності машин.
Запобіжні системи (Багатокорпусні плуги)	Впровадження механізмів розриву кінематичного ланцюга: використання зрізних болтів (що ламаються при критичному навантаженні) або потужних пружинних шарнірів на стійках плуга.	Захищало масивну раму агрегату від деформації та розриву при раптовому зіткненні лемеша з підземним каменем або непокірним корінням на високій швидкості.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історичні витяги з каталогів сільськогосподарської техніки кінця XIX століття та інструкцій з експлуатації. Зверніть увагу на розв'язання проблем вібрації, абразивного зносу та передачі рухів.

Документ 1: З рекламного та технічного каталогу заводу Ельворті (кінець XIX ст.)

«Наші сівалки славляться не лише міцністю, але й точністю. Кожен господар знає, як важливо висіяти рівно стільки пудів на десятину, скільки потрібно. У нашій машині це досягається завдяки особливій коробці шестерень. Переставляючи малі й великі зубчасті коліщата згідно з таблицею, прибитою на кришці бункера, ви можете сповільнити або прискорити хід висівних катушок, не змінюючи швидкості ходу коней. А щоб земля і пісок не з'їдали шестерні, вони надійно сховані під чавунними кришками, які щільно прилягають одна до одної».

Документ 2: З інструкції земського агронома щодо експлуатації кінних жаток

«Найголовніша частина жатки — це різальний апарат і його шатун. Ніколи не замінюйте заводський дерев'яний шатун на залізний стрижень, хай би як вам не хотілося зробити його "вічним"! Дерево тут стоїть не заради економії. Коли ніж швидко літає туди-сюди, він б'є і сіпає машину з величезною силою. Якщо поставити залізну тягу, вона передасть усі ці удари на головні шестерні, і вони потріскаються за один день. Ясеновий шатун пружинить і пом'якшує цей шалений хід».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Кінематичний аспект (Коробка передач):** Проаналізуйте Документ 1. Опишіть емпіричну логіку зміни норми висіву. Як перестановка зубчастих коліс різного діаметра впливала на кутову швидкість висівного вала? Чому інженери змушені були застосувати зубчасту передачу, а не просто з'єднати вал сівалки з віссю колеса безпосередньо?

2. **Трибологія та надійність:** Чому захист шестерень від пилю (закриті картери) став критичною умовою саме для аграрної техніки? Що відбувається з відкритими латунними або чавунними шестернями, якщо між їхніми зубцями потрапляє кварцовий пісок із поля?
3. **Динаміка і матеріалознавство:** Аналізуючи Документ 2, поясніть з точки зору динаміки машин, чому швидкий зворотно-поступальний рух (постійна зміна напрямку) створює руйнівні вібрації. Яку інженерну функцію (окрім передачі руху) виконував довгий дерев'яний шатун із пружного ясеня в металевій жатці?

Еталон відповіді викладача:

1. Безпосереднє з'єднання жорстко прив'язало б обертання катушок до обертів колеса, позбавивши фермера можливості змінювати норму висіву (наприклад, для дрібного насіння потрібна одна швидкість, для крупного — інша). Змінні шестерні змінюють передаточне відношення (співвідношення кількості зубців ведучого та веденого коліс). Якщо ведуче колесо велике, а ведене мале — швидкість вала зростає, насіння висівається густіше. Ця система стала класичною механічною коробкою передач.
2. Кварцовий пісок має величезну твердість. Потрапляючи між металевими зубцями змащеної передачі, він перетворює мастило на потужну абразивну пасту (рідкий наждак). Це призводить до миттєвого стирання і зміни епіциклоїдального профілю зубців, що викликає люфти, удари і повне руйнування механізму. Закриті чавунні картери забезпечили ізоляцію кінематичних пар від агресивного середовища.
3. Різальний ніж жатки масою в кілька кілограмів змінює напрямок руху сотні разів на хвилину. Згідно з законами динаміки, зупинка і миттєвий розгін маси у зворотному напрямку породжує колосальні сили інерції, які передаються на приводний механізм як удари. Металевий шатун жорстко передав би ці удари на тендітні шестерні редуктора. Дерев'яний (ясеновий) шатун має природну еластичність; він працює як демпфер, злегка згинаючись і поглинаючи високочастотні вібрації, рятуючи основну машину від втоми матеріалу.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Динамічна криза: Захист рами від пікових ударів)

Ситуація: Перехід до механізованого обробітку землі на великих швидкостях створив нову проблему. Під час оранки багатокорпусним плугом (який тягне локомотив або важка кінна упряж) леміш плуга на швидкості натрапляє на масивний гранітний валун, прихований глибоко під землею. Виникає миттєвий жорсткий удар. Тяглова сила продовжує тягнути вперед, а плуг застопорився. У результаті масивна сталева рама плуга деформується і скручується гвинтом, агрегат йде на списання.

Завдання: Спираючись на розуміння опору матеріалів та передачі зусиль, запропонуйте інженерне рішення, яке дозволить захистити дорогу несучу раму плуга від руйнування без збільшення її товщини (ваги). Який елемент "запланованого руйнування" або просторової геометрії слід додати у вузол кріплення лемеша до рами?

Очікуване рішення: Якщо конструкція абсолютно жорстка, вся кінетична енергія удару витрачається на її деформацію. Щоб врятувати раму, інженер повинен розірвати кінематичний ланцюг у момент критичного перевантаження.

Варіант 1 (Зрізний болт): Леміш кріпиться до стійки спеціальним сталевим болтом, який математично розрахований на певне зусилля зрізу. Під час нормальної оранки болт витримує опір землі. Але при ударі об камінь опір миттєво перевищує межу міцності болта — болт зрізається (руйнується), леміш вільно відкидається назад, а рама залишається цілою. Селянину достатньо вставити новий дешевий болт і продовжити роботу.

Варіант 2 (Пружинний запобіжник): Стійка плуга кріпиться до рами через потужний пружинний шарнір. При ударі пружина розтягується (акумулюючи енергію), стійка відхиляється назад, «перестрибує» камінь, а потім під дією пружини автоматично повертається в робоче (вертикальне) положення. Обидва рішення є класичними прикладами керування потоками енергії в екстремальних умовах.

Кейс 2 (Матеріалознавча криза: Перехід від чавуну до сталі)

Ситуація: Ранні механізовані агрегати були дуже важкими, оскільки більшість їхніх деталей (опорні колеса, зірочки, корпуси) виливалися з чавуну. Чавун — дешевий матеріал і добре чинить опір стиску. Але при виготовленні лемешів плуга або різальних сегментів жатки чавун виявив два фатальні недоліки: він надто крихкий (відламується при ударах об каміння) і погано тримає гостре лезо (швидко тупиться). Звичайне залізо, навпаки, не ламається, але воно занадто м'яке і швидко стирається (зношується) від тертя об піщаний ґрунт.

Завдання: Як інженер-металург епохи індустріалізації, запропонуйте спосіб обробки металу для виготовлення лемеша плуга, який поєднав би дві взаємовиключні властивості: твердість поверхні (щоб лезо різало землю і не стиралося) та загальну в'язкість і пружність деталі (щоб вона не розкололася при ударі).

Очікуване рішення: Інженерне рішення полягає у переході до використання сталі та застосуванні **складної термічної обробки (цементації та поверхневого гартування)**.

Механіка процесу: Лезо лемеша не просто розжарюють і охолоджують. Його піддають процесу збагачення поверхневого шару вуглецем. У результаті гартування зовнішня поверхня лемеша стає надзвичайно твердою і зносостійкою (здатною протистояти абразивній дії землі та самозаточуватися в процесі тертя). Водночас серцевина (внутрішній об'єм) металевої пластини залишається відносно м'якою, в'язкою і пружною. Ця м'яка серцевина діє як внутрішній амортизатор, не дозволяючи твердій поверхні тріснути і розлетітися на шматки при ударному навантаженні від каменів. Цей принцип композитної міцності металу здійснив революцію у створенні ґрунтообробної техніки.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *кривошипно-повзунковий механізм, передаточне відношення, ексцентрик, взаємозамінність деталей, зрізний болт, абразивне зношування, кінематичний ланцюг.*
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові переваги масового заводського виробництва (з використанням лекал і штампів) порівняно з індивідуальним ремісничим виготовленням складних механізмів.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Вершиною аграрної механіки до тракторної ери стала кінна снопов'язалка — машина, яка не лише зрізала хліб, але й автоматично формувала сніп та зав'язувала на ньому вузол зі шпагату за допомогою спеціального в'язального апарата (винахід Дж. Еплбі).

- **Завдання:** Використовуючи історичну інженерну літературу, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть логіку роботи в'язального апарата як раннього "механічного комп'ютера". Опишіть, як складний просторовий кулачковий механізм синхронізував рухи голки (що подавала шпагат) та гачка (що формував вузол), забезпечуючи чітку послідовність дій без участі людини.

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Від колеса-опори до колеса-ротора: як передача кінетичної енергії змінила філософію сільськогосподарської техніки».
2. «Стандартизація як рушій прогресу: соціальні та економічні наслідки впровадження взаємозамінних деталей на вітчизняних заводах».
3. «Інженерія в агресивному середовищі: еволюція методів захисту машин від абразивного пилу та динамічних ударів поля».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та розуміння фізичних процесів (кінематика перетворення рухів, передаточні числа, зношування) під час аналізу аграрної техніки — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових динамічних та матеріалознавчих кейсів (боротьба з ударами та вібрацією) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досвід індустріалізації аграрного сектору на загальні закони розвитку масового виробництва у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 12: Дослідження надійності паротягів та пароплавів вітчизняного виробництва (розрахунки на міцність та втома матеріалів)

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-механічного аналізу, вивчення динаміки транспортних систем та фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Проаналізувати інженерні виклики інтенсивного розвитку транспортного машинобудування в Україні у ХІХ — на початку ХХ століття (заводи Харкова, Луганська, верфі Миколаєва та Херсона). Дослідити перехід від розрахунків на статичну міцність до розв'язання складних динамічних задач, пов'язаних із вібраціями, знакозмінними навантаженнями та небезпечним явищем втоми матеріалів металевих конструкцій.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички якісного (вербального) аналізу напружено-деформованого стану складних рухомих систем. Навчити концептуально описувати вплив концентраторів напружень, процеси зародження мікротріщин, принципи динамічного балансування мас та просторового згину суднових корпусів без використання сучасного математичного апарату та формул.
3. **Соціально-адаптивна:** Використати історичний досвід боротьби з транспортними катастрофами для виховання найвищого рівня професійної етики та відповідальності інженера. Продемонструвати, що транспортний засіб — це мобільне середовище підвищеної небезпеки, де найменша неточність у проектуванні деталі коштує сотень людських життів. Закласти фундамент нульової толерантності до нехтування правилами безпеки та регламентами дефектоскопії.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Стационарна та мобільна машина: відмінності в експлуатаційному середовищі та масогабаритних обмеженнях.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія транспортного машинобудування. Динаміка паротяга (балансування колісних пар) та будівельна механіка пароплава (загальний поздовжній згин корпусу на хвилях). Втома металу як головний прихований ворог.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історико-технічними першоджерелами. Аналіз звітів залізничних інспекторів Катерининської залізниці та корабелів Миколаївського адміралтейства про раптові руйнування сталевих конструкцій.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач (ліквідація галопування локомотива, боротьба з концентраторами напружень в осях та валах).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-МЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «Парова машина на фабриці стояла на масивному цегляному фундаменті і працювала в ідеальних умовах. Коли ж інженери поставили цей двигун на колеса паротяга або в трюм пароплава, класична механіка зіткнулася з жорстокою реальністю. Мобільна система несе на собі власну вагу, паливо і корисний вантаж, постійно зазнаючи ударів від стиків рейок або ударів морських хвиль. Заводи Харкова та Луганська, які масово випускали паротяги, зіткнулися з невідомим раніше явищем: сталеві осі та шатуни, які на випробуваннях легко витримували десятикратну вагу, в реальних рейсах раптово і безшумно розліталися на шматки. Це була втома металу — наслідок мільйонів циклів мікроскопічних деформацій. З іншого боку, на верфях Миколаєва корабелі виявили, що сталевий корпус стометрового судна гнеться на хвилях, розриваючи заклепки. Транспортна революція змусила інженерів перейти від примітивної статички до глибокого вивчення динаміки, витривалості та просторової жорсткості».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз міцності транспортних систем

Транспортний вузол	Фізико-механічна сутність навантаження	Інженерна проблема та наслідки
Корпус пароплава (Загальна міцність)	Корпус діє як гігантська порожниста балка коробчастого перерізу, що спирається на нестабільну поверхню (хвилі). Виникає загальний поздовжній згин: перегин на гребені хвилі та прогин у западині.	Верхня палуба та днище судна попеременно зазнають колосального розтягування та стискання. Помилка в розрахунку товщини обшивки чи шпангоутів призводила до того, що судно просто ламалося навпіл у відкритому морі.
Гребний вал	Довга сталева вісь, що передає обертання від парової машини до гвинта. Гвинт вкручується у воду, штовхаючи судно вперед.	Складний опір матеріалів. Вал одночасно скручується (передаючи крутний момент) і зазнає сильного поздовжнього стискання (передаючи тягове зусилля гвинта на зав'язаний підшипник корпусу).
Вісь колісної пари паротяга	Статична вага локомотива тисне на краї осі (через букси), згинаючи її. При цьому вісь постійно обертається разом із колесами.	Кожна мікроскопічна точка на поверхні металевої осі за один оберт переходить із зони максимального стискання (згори) у зону максимального розтягування (знизу). Виникає небезпечне знакозмінне (циклічне) навантаження.
Шатунно-кривошипна група локомотива	Важкі сталеві шатуни здійснюють складний зворотно-поступальний та обертальний рух із високою швидкістю зовні коліс.	Незбалансовані рухомі маси генерують шалені відцентрові сили та сили інерції, які намагаються підкинути паротяг у повітря або скинути його з рейок (явище галопування та виляння).

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історичні звіти інженерів-шляховиків та суднобудівників. Визначте емпіричні причини катастроф і логіку зародження теорії надійності.

Документ 1: Зі звіту інспектора Катерининської залізниці (кінець XIX ст.)

«Аварія вантажного потяга сталася через злам передньої осі локомотива. При огляді місця зламу комісія виявила дивну картину. Метал не зігнувся, як це буває при перевантаженні. Поверхня зламу була абсолютно гладкою, блискучою по краях і зернистою лише в самому центрі. Злам стався точно в тому місці, де вісь різко змінювала свою товщину, переходячи від тонкої шийки підшипника до потовщення, на яке напресовується колесо. Заводські випробування цієї сталі показували її найвищу якість. Машиністи повідомляють, що ніякого удару перед аварією не було».

Документ 2: Записки корабельного інженера Миколаївського адміралтейства

«Коли ми вивели новий вугільник у штормове Чорне море, я спостерігав за палубою. Стоячи на кормі, було чітко видно, як при проходженні довгої хвилі під центром судна палуба натягувалася, наче струна, а заклепки на стиках сталевих листів починали стогнати і "плакати" (пропускати воду). Стало очевидним, що судно не можна розглядати просто як плавучий ящик. Воно дихає і гнеться. Якщо не посилити поздовжні стрингери вздовж бортів, наступний шторм розірве палубу, як папір».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Матеріалознавчий аспект (Втома металу):** Проаналізуйте гладку поверхню зламу в Документі 1. Чому відсутність видимого згину (пластичної деформації) свідчить про довготривалий, прихований процес руйнування? Що символізують блискучі краї і зерниста серцевина?
- Концентратори напружень:** У звіті вказано, що злам осі відбувся у місці «різкої зміни товщини» (прямого кута на металевому валу). Чому, з точки зору розподілу силових

ліній напруження, такі геометричні переходи є найвразливішими місцями деталі при циклічних навантаженнях?

3. **Будівельна механіка корабля:** Поясніть спостереження корабеля (Документ 2). Чому при проходженні хвилі під центром судна (перегин) саме верхня палуба натягується (розтягується), а днище стискається? Яку роль у запобіганні цьому розриву відіграють поздовжні стрингери (сталеві балки, що йдуть уздовж усього корпусу)?

Еталон відповіді викладача:

1. Цей опис є класичною клінічною картиною втомного руйнування. Під дією мільйонів обертів під навантаженням на поверхні осі виникає мікротріщина. З кожним обертом вона проростає глибше. Краї тріщини постійно труться один об одного, тому поверхня зламу стає зашліфованою і блискучою («пляжний малюнок»). Зерниста серцевина — це та мала частина здорового металу, яка залишилася цілою, але вже не змогла витримати вагу і миттєво тріснула.
2. Будь-який різкий перехід (гострий кут, отвір, подряпина) діє як концентратор напружень. Уявіть потік води, що натрапляє на звуження русла: швидкість і тиск там різко зростають. Так само силові лінії напружень скупчуються в гострому куті осі. Там виникають пікові локальні перенапруження, що перевищують межу витривалості металу. Саме там завжди починає рости втомна тріщина.
3. Корабель працює як балка. Коли центр спирається на хвилю, а ніс і корма провисають у повітрі, корпус прагне вигнутися дугою догори. Згідно з законами механіки балок, волокна на випуклій стороні дуги (палуба) розтягуються, а на ввігнутій (днище) стискаються. Поздовжній стрингер — це арматура корабля. Він бере на себе ці розривні зусилля, діючи як пружний скелет, і не дає тонким листам обшивки порватися по лінії заклепок.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Динамічна криза: Балансування швидкохідного паротяга)

Ситуація: Харківський паровозобудівний завод випустив новий потужний пасажирський паротяг. Він має величезні ведучі колеса і важкі зовнішні шатунні, що з'єднують їх. На низьких швидкостях машина йде плавно. Але під час розгону до 80 км/год починається жаклива вібрація. Паротяг починає буквально підстрибувати на рейках (змінюючи тиск на бандажі від нуля до колосальних ударів), а його ніс небезпечно виляє вліво-вправо. Машиніст змушений скидати швидкість, інакше потяг зійде з рейок.

Завдання: Спираючись на закони кінематики та інерції мас, поясніть природу цього руйнівного явища (галоупування). Запропонуйте єдине можливе геометрично-механічне рішення, яке інженери мають застосувати безпосередньо на самих ведучих колесах, щоб зрівноважити масу рухомих шатунів і стабілізувати локомотив.

Очікуване рішення: Причина вібрацій криється у наявності незбалансованих рухомих мас. Шатун і кривошип кріпляться до колеса не по центру, а зі зміщенням. Під час швидкого обертання ця маса створює величезну відцентрову силу, вектор якої постійно обертається. Коли кривошип вгорі — сила тягне паротяг угору (відриваючи від рейок), коли внизу — вдавлює в рейку з руйнівним ударом.

Інженерне рішення: Застосування **динамічного балансування**. Інженери зобов'язані відлити на самому ведучому колесі, точно навпроти кріплення шатуна (на протилежному боці від центру осі), масивну металеву «наплавку» — **противагу**. Масу і форму цієї противаги вираховують так, щоб її власна відцентрова сила була точно рівною і протилежно спрямованою відцентровій силі кривошипа та частини шатуна. Взаємно знищуючи одна одну, ці сили звільняють паротяг від вібрацій, гарантуючи м'який і безпечний хід на будь-якій швидкості.

Кейс 2 (Матеріалознавча криза: Порятунок півосей транспортних засобів)

Ситуація: У вас транспортний парк. Ви замовили на місцевому заводі нові сталеві півосі для вагонів замість зношених. Завод виточив їх точно за розмірами, використовуючи найкращу міцну сталь. Проте за місяць експлуатації всі нові осі зламалися в одному й тому ж місці — там, де вісь різко переходить від товстої частини до тонкої різьби. Викликаний експерт заявляє, що сталь чудова, навантаження в нормі, але кресляр заводу припустився фатальної помилки у

профілюванні (формі) деталі, намалювавши перехід у вигляді ідеального прямого кута (90°).

Завдання: Як фахівець із прикладної механіки, поясніть, чому ідеальний прямий кут на деталі, що обертається під навантаженням, є «смертним вироком» для металу. Яку зміну в кресленні ви повинні негайно внести (яку форму надати переходу), щоб нові осі служили десятиліттями?

Очікуване рішення: Прямий внутрішній кут — це найагресивніший концентратор напружень. Всі силові лінії (деформації згину) різко сходяться в цій точці, перемножуючи руйнівну силу в десятки разів, що гарантовано запускає механізм втоми металу (утворення мікротріщини).

Інженерне рішення: На кресленні заборонено робити різкі ступінчасті переходи діаметрів. Необхідно запровадити **галтель (плавне радіусне заокруглення)** переходу. Замість прямого кута стружкою на токарному верстаті знімається плавна дуга великого радіуса. Це дозволяє силовим лініям напружень плавно огинати звуження деталі, рівномірно розподіляючи навантаження на більшу площу. Крім того, інженер вимагатиме ретельного шліфування та полірування цієї галтелі, щоб ліквідувати навіть мікроскопічні подряпини від різця, які також можуть стати осередками зародження тріщин.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з історико-інженерної перспективи терміни: *втома матеріалів, концентратор напружень, циклічне знакозмінне навантаження, динамічне балансування, протизагаль, галтель, загальний поздовжній згин*.
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові відмінності між роботою металу на розрив (статичне випробування) та випробуванням на витривалість (втому).

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Еволюція суднобудування на верфях Миколаєва супроводжувалася переходом від гребних коліс (розташованих по бортах) до гребного гвинта (на кормі).

- **Завдання:** Використовуючи історичну та інженерну літературу, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть з точки зору гідродинаміки та механіки, чому гребний гвинт виявився набагато ефективнішим під час сильного хвилювання на морі. Яку проблему вирішив гвинт у порівнянні з бортовими колесами, які при сильному боковому крені судна по черзі виходили з води, призводячи до холостого ходу машини та шалених динамічних ударів по трансмісії при повторному зануренні?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Невидимий вбивця металу: як вивчення явища втоми матеріалів змінило філософію проєктування рухомих систем».
2. «Математика мас: балансування паротяга як тріумф динаміки над грубою силою інерції».
3. «Корабель як живий організм: боротьба інженерів-корабелів із деформацією сталевих гігантів в умовах водної стихії».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та розуміння фізичних процесів (знакозмінні навантаження, відцентрові сили, згин балки) під час аналізу транспортних систем — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових динамічних та матеріалознавчих кейсів (ліквідація галоупування локомотива, боротьба з концентраторами напружень без використання формул) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати історичний досвід транспортного машинобудування на сучасні етичні стандарти безпеки у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 13: Аналіз конструктивних рішень та опору матеріалів у вітчизняній аерокосмічній галузі

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-механічного аналізу, вивчення інноваційного матеріалознавства та фахового інженерного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Дослідити найвищі досягнення вітчизняної інженерної думки другої половини ХХ — початку ХХІ століття на прикладі конструкторських бюро «Антонов» (авіабудування) та «Південне» / завод «Південмаш» (ракетобудування). Проаналізувати перехід прикладної механіки до екстремальних умов експлуатації, де головним інженерним завданням є забезпечення абсолютної надійності при радикальному зниженні маси конструкції.
2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички вербального і логічного аналізу надскладних просторових систем (тонкостінних оболонок, багатоопорних шасі, ізогридних структур). Навчити концептуально описувати поведінку полімерних композитів, алюмінієво-літєвих сплавів та зварних швів в умовах криогенних температур, аеродинамічних вібрацій та циклічних перепадів тиску без застосування математичного апарату та розрахункових формул.
3. **Соціально-адаптивна:** Використати статус України як космічної та авіаційної держави для виховання професійної гордості, патріотизму та високої інженерної етики. Продемонструвати, що здатність нації створювати надважкі транспортні літаки (Ан-124, Ан-225) та ракети-носії є маркером її інтелектуального суверенітету, а робота інженера-механіка в цій галузі вимагає безкомпромісної відповідальності за кожне конструктивне рішення.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Подолання гравітації: чому в авіації та космонавтиці класичний опір матеріалів ХІХ століття виявився неефективним.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія екстремальних навантажень. Концепція «безпечного руйнування» (Fail-Safe) в авіації. Ізогридні (вафельні) оболонки ракет та анізотропія композитних матеріалів.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історико-технічними першоджерелами. Аналіз спогадів видатних генеральних конструкторів (О. Антонова, М. Янгеля) щодо пошуку компромісу між міцністю та вагою.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач (запобігання втраті стійкості паливних баків, оптимізація розподілу ваги надважких літаків на злітно-посадкову смугу).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-МЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «У традиційному наземному машинобудуванні, якщо інженеру не вистачає міцності, він просто додає більше металу. В аерокосмічній галузі це правило не працює. Кожен зайвий кілограм конструкції ракети означає втрату цінного корисного навантаження (супутника), а в авіації — колосальні збитки на спалене паливо. Українські конструкторські бюро «Антонов» та «Південмаш» здійснили революцію в прикладній механіці, навчившись створювати гігантські апарати, які на 90% складаються з порожнечі та палива, але витримують космічні перевантаження. Вони відмовилися від важкого чавуну та сталі на користь легких сплавів, замінили заклепки на високоточне електронно-променеве та аргондугове зварювання, а головне — перейшли від боротьби з деформаціями до свідомого керування ними. Сьогодні ми розберемо конструктивні рішення, які зробили українську техніку еталоном надійності у всьому світі».

Таблиця 1. Інженерно-історичний аналіз аерокосмічних конструкцій

Конструктивне рішення	Фізико-механічна сутність	Застосування та переваги (КБ Антонов / Південмаш)
Ізогريدна (вафельна) оболонка	Створення сітки перехресних ребер жорсткості (у вигляді ромбів або трикутників) на внутрішній поверхні тонкої циліндричної стінки. Виготовляється методом фрезерування суцільної плити металу або хімічного травлення.	Застосовується в паливних баках ракет (Південмаш). Тонка стінка (кілька міліметрів) утримує колосальний внутрішній тиск газу, а монолітні ребра запобігають втраті стійкості (зминанню) корпусу під вагою самої ракети під час старту.
Концепція "Fail-Safe" (Безпечне руйнування)	Проектування конструкції з багаторазовим резервуванням. Допускається виникнення втомної мікротріщини в польоті, але її поширення гарантовано зупиняється спеціальними стоперами (підсилювальними стрічками).	Застосовується у фюзеляжах літаків (Антонов). Замість того щоб робити фюзеляж надмірно товстим і важким (щоб тріщина не виникла ніколи), інженери роблять його легким, але гарантують, що тріщина не призведе до руйнування до планового ремонту.
Багатоопорна кінематика шасі	Створення шасі з десятків колісних візків, кожен з яких має незалежну амортизацію та складну просторову кінематику "присідання".	Дозволило літкам-гігантам (Ан-124 "Руслан", Ан-225 "Мрія") рівномірно розподілити колосальну масу по бетону, не руйнуючи злітні смуги. Режим "присідання" опускає ніс літака, створюючи ідеальний пологий пандус для завантаження техніки.
Полімерні композиційні матеріали (ПКМ)	Матеріали, що складаються з міцних волокон (вуглецевих, скляних), залитих полімерною смолою (матрицею). Характеризуються яскраво вираженою анізотропією (різною міцністю у різних напрямках).	Заміна металевих деталей хвостового оперення або обтічників. Інженер укладає волокна композиту виключно вздовж ліній очікуваного навантаження, прибираючи матеріал звідти, де він не працює, досягаючи ідеального балансу міцності та невагомості.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте спогади видатних інженерів-конструкторів та виявіть емпіричну логіку розв'язання фундаментальних проблем механіки в аерокосмічній галузі.

Документ 1: Зі спогадів розробників надважких літаків КБ «Антонов»

«Фюзеляж транспортного літака — це велетенська посудина під тиском. Щоразу, коли літак набирає висоту 10 кілометрів, тиск за бортом падає, і повітря всередині кабіни розпирає фюзеляж, намагаючись його розірвати. Коли літак знижується — фюзеляж знову "здувається". За тисячі польотів цей "подих" металу неминуче викликає втому дюралюмінію. Ми не могли зробити обшивку товстою, бо літак би не злетів. Тому ми застосували систему стрінгерів та шпангоутів, до яких обшивка не просто приклепувалася, а приклеювалася спеціальними клеями та точковим зварюванням, створюючи монолітну павутину, здатну зупинити розрив».

Документ 2: З технічних нотаток конструкторів ракет (КБ «Південне»)

«Паливний бак ракети несе в собі сотні тонн рідкого кисню та гасу. Стінки бака зроблені з найлегшого алюмінієво-літєвого сплаву і настільки тонкі, що порожня ракета, якби на неї просто поставили корисне навантаження, зім'ялася б, як порожня пивна бляшанка під ногою. Жорсткість цій "бляшанці" надає внутрішній наддув інертним газом. Але щоб гарантувати стійкість під час диких вібрацій старту, ми вифрезеруємо на стінках тисячі трикутників. З'єднати ці баки між собою болтами неможливо — рідина просочиться. Тільки аргонодугове зварювання автоматом дає ідеальний, герметичний шов без пор».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

1. **Динаміка і втома матеріалів:** Опишіть фізику явища, про яке згадують інженери "Антонова" (Документ 1). Чому постійне циклічне "роздування" і "стискання" тонкої обшивки є набагато небезпечнішим за постійний статичний тиск тієї ж сили? Яку роль тут відіграє метод з'єднання деталей (клей-зварювання порівняно із заклепками, що вимагають свердління отворів)?
2. **Опір матеріалів (Стійкість оболонок):** Аналізуючи Документ 2, поясніть явище «втрати стійкості» (зминання). Чому тонка стінка циліндра чудово витримує внутрішній тиск газу (розтяг), але миттєво складається у гармошку при стисненні зверху донизу? Яким чином система фрезерованих трикутників (ізогрид) вирішує цю проблему без обтяження конструкції?
3. **Технологія зварювання:** Чому для паливних баків космічних ракет механічне кріплення (болти/заклепки) є абсолютно неприпустимим? Які властивості забезпечує автоматичне аргонодугове зварювання алюмінієвих сплавів порівняно з ручним зварюванням в умовах криогенних (наднизьких) температур експлуатації?

Еталон відповіді викладача:

1. Циклічне навантаження спричиняє втому металу: на мікроскопічному рівні накопичуються дислокації в кристалічній решітці, які згодом перетворюються на тріщину. Традиційні заклепки вимагають свердління тисяч отворів в обшивці, а кожен отвір — це концентратор напружень (місце, де зароджується тріщина). Клейове та точкове зварювальне з'єднання знімає ці концентратори, рівномірно розподіляючи напруження по всій площі контакту стрінгера з обшивкою, що радикально підвищує ресурс фюзеляжу.
2. Втрата стійкості — це небезпечний стан, коли тонка конструкція під дією осевого стискання раптово змінює свою форму (випинається), хоча межа міцності металу ще не досягнута. Внутрішній тиск працює на розтяг (металу розтягнутися важко), а вага зверху працює на поздовжній стиск тонкої стінки. Ізогридна сітка працює як просторовий каркас: діагональні та вертикальні ребра мають великий момент інерції перерізу, вони виступають жорсткими балками, що не дають стінці вигнутися, залишаючи основну масу корпусу легкою і тонкою.
3. Ракета зазнає колосальних вібрацій, від яких болтові з'єднання можуть розхитатися. Крім того, рідкий кисень (температура близько -183°C) має високу плинність і просочиться крізь найменший зазор механічного стику. Автоматичне аргонодугове зварювання плавиться в середовищі інертного газу, що не дає кисню з повітря окислювати алюміній. Це утворює монолітний шов без пор і шлакових включень, який зберігає свою пластичність навіть за криогенних температур (коли звичайна сталь стає крихкою, як скло).

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Кінематична криза: Завантаження надважкої техніки)

Ситуація: Ви — інженер-конструктор КБ "Антонов". Вам доручено спроектувати транспортний літак (майбутній Ан-124 "Руслан"), який має перевозити монолітні вантажі вагою понад 100 тонн (турбіни, танки, вагони). Вантажна кабіна розташована на висоті кількох метрів від землі. Стандартний підхід — відкинути хвостову рампу (трап) вниз. Але через велику висоту кабіни кут нахилу цієї рампи виходить занадто крутим: гусенична техніка просто не зможе заїхати по ній вгору, а довгі вантажі застрягнуть на зламі рампи і підлоги.

Завдання: Спираючись на кінематику важільних механізмів та гідравліку, запропонуйте інноваційну систему переднього шасі, яка дозволить радикально зменшити кут заїзду в літак. Яку нетипову функцію (окрім простого пом'якшення посадки) повинна виконувати передня стійка літака на землі?

Очікуване рішення: Інженер розробляє унікальну кінематичну систему "присідання" літака. Замість довгого і крутого заднього трапа, конструктори роблять вантажний люк у носовій частині (вся носова частина разом із кабіною пілотів відкидається вгору за допомогою гідравліки).

Передня стійка шасі проектується як складний важільний механізм. На стоянці екіпаж розблоковує гідроциліндри переднього шасі, стійки кінематично "підламуються" (згинаються

в коліні), і гігантський літак буквально опускає свій ніс на землю. Фюзеляж нахиляється вперед, зменшуючи кут заїзду до кількох градусів. Це перетворює передню рампу на пологий, рівний міст, по якому в літак без зусиль заїжджає будь-яка самохідна техніка.

Кейс 2 (Матеріалознавча криза: Конструювання крила з композитів)

Ситуація: Для створення нового безпілотного апарату або легкого літака вам потрібно спроектувати панель крила. Ви маєте вибір між класичним авіаційним алюмінієм (ізотропним металом, який має однакову міцність у всіх напрямках) та новим вуглепластиком (композитом). В умовах польоту крило працює переважно на згин в одній площині: підйомна сила повітря тисне на крило знизу вгору, намагаючись відірвати його від фюзеляжу.

Завдання: Як фахівець із сучасної прикладної механіки, поясніть перевагу композитного матеріалу для цієї конкретної деталі. Як ви будете укладати шари вуглецевої тканини у матриці перед запіканням, щоб досягти максимальної економії ваги при збереженні міцності на згин? Чому заміна металу на композит вимагає повної зміни філософії проєктування?

Очікуване рішення: Метал має однакову міцність у всіх напрямках (ізотропія). Оскільки крило згинається переважно вгору, міцність металу в інших напрямках (наприклад, уздовж хорди) є "зайвою", а отже, це зайва вага.

Вуглепластик — це анізотропний матеріал. Його вуглецеві нитки мають колосальну міцність на розтяг уздовж самого волокна, але легко ламаються впоперек.

Інженерне рішення: Інженер проєктує деталь так, щоб "малюнок" міцності точно збігався з векторами навантаження. Оскільки головне зусилля йде на розтяг нижньої панелі крила при згині вгору, 80% шарів вуглецевої тканини (препрегу) укладатимуться строго паралельно розмаху крила (від кореня до кінця). Лише 20% шарів укладатимуться по діагоналі для протидії крученню. Там, де навантаження немає, волокна взагалі не кладуть. Таким чином, інженер не просто обробляє готовий матеріал, він **створює сам матеріал під конкретну епюру навантажень**, досягаючи неперевершеного співвідношення міцності та маси, недоступного для традиційної металургії.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з фізико-інженерної перспективи терміни: *ізогридна оболонка, концентратор напружень, метод "безпечного руйнування" (Fail-Safe), композиційний матеріал, анізотропія, аргонодугове зварювання*.
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові відмінності між класичною клепаною дюралюмінієвою обшивкою фюзеляжу та зварною монолітною конструкцією.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Аеродинамічний нагрів (тепловий бар'єр) — одна з головних проблем гіперзвукових апаратів та ракет, що повертаються в атмосферу.

- **Завдання:** Знайдіть історичну та технічну інформацію про те, як вітчизняні інженери застосовували титанові сплави в аерокосмічній галузі. Напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть інженерну логіку використання титану: чому, незважаючи на величезні труднощі механічної обробки та зварювання (вимагає електронно-променевого зварювання у вакуумі), титан став незамінним для деталей, які працюють при температурах, де звичайний авіаційний алюміній повністю втрачає свою несучу здатність і стає "м'яким"?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Темі на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Боротьба за невагомість: як ізогридні оболонки ракет "Південмашу" перемогли закони втрати стійкості».
2. «Кінематика гігантів: інженерний аналіз систем розподілу навантажень та завантаження надважких літаків КБ "Антонов"».
3. «Філософія безпечного руйнування: як уміння керувати втомними тріщинами змінило авіаційну механіку».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки та розуміння фізичних процесів (втрата стійкості, втома, анізотропія) під час аналізу аерокосмічних систем — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових просторових та матеріалознавчих кейсів (без застосування математичних формул) — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати досягнення вітчизняної космічної та авіаційної галузей на загальні принципи оптимізації сучасних інженерних конструкцій у творчому есе — **30 балів**.

МЕТОДИЧНА РОЗРОБКА СЕМІНАРСЬКОГО ЗАНЯТТЯ

ТЕМА 14: Сучасні методи проєктування та моделювання (CAD/CAE системи) механічних процесів

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами порівняльного історико-технологічного аналізу, вивчення віртуального інжинірингу та фахового комп'ютерно-аналітичного кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Проаналізувати наймасштабнішу методологічну революцію в історії інженерної справи — перехід від плоского (двовимірного) креслення та фізичного макетування до створення повноцінних цифрових двійників (Digital Twins) у системах автоматизованого проєктування (CAD). Дослідити принципи роботи систем інженерного аналізу (CAE), зокрема методу скінченних елементів (MSE), який дозволяє віртуально випробовувати деталі на міцність, втому та теплові навантаження ще до їх фізичного виготовлення.
2. **Методологічна:** Сформувані у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички концептуального просторового мислення та логічного аналізу комп'ютерних симуляцій. Навчити вербально описувати складні явища топологічної оптимізації, генеративного дизайну та алгоритми пошуку концентраторів напружень через кольорові епюри, без застосування математичного апарату тензорного числення.
3. **Соціально-адаптивна:** Продемонструвати, як сучасні цифрові інструменти формують нову інженерну етику, де пріоритетом стає радикальне зниження ресурсомісткості та вуглецевого сліду виробництва. Виховати усвідомлення того, що сучасний український інженер-механік — це не просто кресляр, а архітектор віртуальних світів, чия здатність оптимізувати конструкції в CAD/CAE системах є запорукою технологічної та економічної конкурентоспроможності держави на глобальному ринку.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Еволюція інструментарію: від паперового ватману і кульмана до алгоритмів штучного інтелекту та кіберфізичних систем.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Анатомія цифрового інжинірингу. Параметричне 3D-моделювання (CAD). Метод скінченних елементів у системах CAE: невидима фізика, розкладена на трикутники.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з історико-технологічними свідченнями. Аналіз переходу вітчизняних машинобудівних та авіаційних КБ від плазово-шаблонного методу до безпаперових цифрових технологій.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових інженерних задач у віртуальному середовищі (проведення віртуального краш-тесту, топологічна оптимізація кронштейна для аерокосмічної галузі).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ ВІРТУАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

Слово викладача: «Протягом століть головним символом інженера був кульман — велика креслярська дошка. Проектування автомобіля чи літака вимагало створення тисяч квадратних метрів паперових креслень. Кожна деталь малювалася у трьох плоских проєкціях. Якщо виявлялася помилка, або потрібно було змінити один розмір, інженери мусили лезом зрізати туш із паперу і перемальовувати весь вузол, витрачаючи місяці. Перевірка міцності здійснювалася жорстоко і дорого: будували реальний металевий прототип машини і ламали його на випробувальному стенді. Якщо він ламався не там, де треба, все починалося спочатку. Впровадження CAD (Computer-Aided Design) та CAE (Computer-Aided Engineering) систем змінило філософію творення. Сьогодні ми не креслимо лінії — ми програмуємо фізичні тіла. Ми створюємо "цифровий двійник", який має віртуальну масу, пружність і теплоємність. І всі закони механіки, які вивели видатні українські вчені в минулому, тепер зашиті в алгоритми цих програм, дозволяючи нам бачити невидимі напруження всередині металу ще до того, як руда буде видобута з шахти».

Таблиця 1. Еволюційний перехід від традиційного до цифрового проєктування

Етап життєвого циклу	Традиційний метод (XX століття)	Цифровий метод (Індустрія 4.0: CAD/CAE)
Геометричне проєктування	Плоске (2D) креслення на папері. Інженер мусив утримувати тривимірний образ деталі виключно у власній уяві. Ручне обчислення маси та центру ваги.	Параметричне 3D-моделювання (CAD). Створення твердотільної об'ємної моделі. Зміна одного параметра (наприклад, діаметра отвору) автоматично перебудовує всю модель, оновлює збірні одиниці та перераховує фізичні властивості (масу, моменти інерції).
Перевірка збираємості (Колізії)	Плазово-шаблонний метод. Виготовлення фанерних або гіпсових макетів у натуральну величину. Якщо труба накладалася на балку — макет переробляли.	Віртуальна збірка. CAD-система автоматично аналізує тисячі деталей і миттєво підсвічує місця "перетинів" (колізій). Дозволяє перевірити кінематику механізмів (рух важелів і шестерень) прямо на екрані.
Розрахунок на міцність та надійність	Використання наближених аналітичних методів з величезними запасами міцності. Виготовлення дорогих фізичних прототипів і руйнування їх пресами для виявлення слабких місць.	Метод скінченних елементів (CAE/FEA). Комп'ютер розбиває 3D-модель на мільйони дрібних елементів (тетраєдрів). Прикладання віртуального навантаження генерує кольорову епіюру: система точно показує, де виникнуть критичні напруження, дозволяючи оптимізувати форму без жодного шматка металу.
Оптимізація маси	Інтуїтивне вирізання отворів або стоншення стінок там, де інженер вважав за можливе. Високий ризик послаблення деталі.	Топологічна оптимізація. Комп'ютер сам аналізує шляхи передачі зусиль всередині деталі і "розчиняє" (видаляє) весь матеріал, який не несе навантаження. Деталь набуває біонічної (кісткоподібної) форми, економлячи до 50% маси дорогого титану чи алюмінію при 100% збереженні жорсткості.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте свідчення інженерів про переломний етап впровадження комп'ютерних технологій у важке машинобудування та авіацію, щоб зрозуміти ментальну трансформацію професії.

Документ 1: Зі спогадів головного конструктора вітчизняного авіаційного КБ про перехід на цифрові технології (кінець 1990-х років)

«Коли ми проектували старі машини, у нас були "плази" — величезні зали, де на алюмінієвих листах у натуральну величину, повзаючи на колінах, креслили перерізи крила і фюзеляжу. Відхилення на міліметр вважалося катастрофою, але людська рука не ідеальна. Запровадження CAD-систем викликало шок у старих майстрів. Комп'ютер не дозволяв провести лінію "приблизно". Він вимагав абсолютної геометричної замкненості контурів. Але справжнє диво сталося, коли ми відправили першу 3D-модель шпангоута на заводський верстат з ЧПК напряду, без паперового креслення. Деталь вийшла ідеальною з першого разу, а цикл її створення скоротився з трьох місяців до одного тижня».

Документ 2: Витяг із технічної статті про впровадження методів САЕ в розробку газових турбін

«Найстрашнішим сном турбобудівника є термічні деформації лопаток. Усередині турбіни режуть гази з температурою понад тисячу градусів, а лопатка обертається з шаленою швидкістю. Раніше ми могли дізнатися про дефекти охолодження лише після того, як турбіна розплавилася на стенді і розлетілася на шматки, знищивши місяці праці. Тепер ми використовуємо системи САЕ. Програма розбиває віртуальну лопатку на сітку з трьох мільйонів вузлів. Ми задаємо віртуальний потік гарячого газу, і комп'ютер розфарбовує лопатку в кольори температури, показуючи нам локальні зони перегріву. Ми змінюємо форму внутрішніх каналів охолодження мишкою, знову запускаємо симуляцію — і бачимо, як "червоні" зони стають безпечними "зеленими". Стенд тепер використовується лише для підтвердження того, що комп'ютер мав рацію».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

1. **Геометричний аспект (Точність та індустрія):** Проаналізуйте Документ 1. Що таке концепція «наскрізного проектування» (безпаперової технології)? Чому передача математичної 3D-моделі безпосередньо з комп'ютера конструктора (CAD) на комп'ютер верстата (CAM) радикально зменшує вплив людського фактора та відсоток браку на виробництві?
2. **Фізико-аналітичний аспект (МСЕ):** Опишіть логіку роботи програми, згаданої в Документі 2. Комп'ютер не розуміє "суцільного металу", він здатний працювати лише з дискретними (окремими) частинками. Як метод розбиття складної тривимірної лопатки на мільйони простих трикутних пірамідок (тетраєдрів) дозволяє машині розрахувати надскладні просторові теплові та механічні деформації?
3. **Економіко-етичний аспект:** Як можливість провести тисячі віртуальних випробувань (САЕ) до виготовлення першої реальної деталі змінює філософію інженерної відповідальності? Чому сьогодні відмова інженера від комп'ютерної симуляції критично важливих вузлів (наприклад, гальмівної системи чи елементів моста) вважається професійною недбалістю?

Еталон відповіді викладача:

1. Безпаперова технологія усуває етап інтерпретації. Раніше робітник читав двовимірне креслення, уявляв деталь і вручну керував верстатом. Кожен етап ніс ризик помилки. Наскрізне проектування означає, що єдина цифрова 3D-модель (двійник) є еталоном. САМ-система автоматично перетворює цю геометрію на траєкторію руху фрези верстата з ЧПК, гарантуючи мікронну відповідність готової деталі задуму інженера.
2. Це суть Методу скінченних елементів (МСЕ). Аналітично розрахувати напруження для деталі складної форми (з вигинами, отворами, внутрішніми каналами) неможливо. Комп'ютер "ріже" модель на мільйони крихтих, правильних геометричних фігур, для кожної з яких діють прості закони фізики пружного тіла. Далі він вирішує гігантську систему рівнянь, обчислюючи, як деформація одного маленького трикутника передається сусідньому. Зібравши ці мільйони мікрореакцій разом, система видає загальну картину поведінки всієї складної деталі.
3. Віртуальні випробування докорінно здешевлюють процес пошуку помилок. Вони дають інженеру можливість перевірити деталь на екстремальні, позаштатні навантаження, які важко або занадто небезпечно відтворити фізично. Етика сучасного інжинірингу вимагає вичерпати всі можливості віртуального краш-тесту, оскільки

нехтування цим інструментом означає свідоме перенесення ризику виявлення дефекту на кінцевого споживача (пасажира літака чи водія).

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Криза міцності: Віртуальний краш-тест та оптимізація геометрії)

Ситуація: Ваше КБ проєктує підвіску для нового вітчизняного бронеавтомобіля. Ви створили 3D-модель складного сталевого важеля підвіски в CAD-системі. Наступний крок — перевірка міцності в CAE-системі. Ви жорстко фіксуєте віртуальні точки кріплення і прикладаєте до місця кріплення колеса динамічний удар (симулюючи наїзд на перешкоду на швидкості). Комп'ютер генерує кольорову епюру напружень. Вся деталь забарвлена в спокійний синій та зелений кольори (напруження мінімальні), але в одному місці — де циліндрична втулка переходить у плоску частину важеля під прямим кутом — спалахує яскраво-червона зона. Система сигналізує, що напруження тут перевищують межу текучості сталі. Віртуальна деталь тріснула.

Завдання: Спираючись на логіку цифрового інжинірингу та знання про концентратори напружень, опишіть ваш алгоритм дій у CAD/CAE середовищі. Як ви ліквідуєте "червону зону" без заміни матеріалу на дорожчий і без потовщення всього важеля (що збільшило б масу машини)?

Очікуване рішення: "Червона зона" — це візуалізація концентратора напружень. Прямий внутрішній кут змусив силові лінії скупчитися в одній точці.

Алгоритм дій інженера:

1. Повернення в CAD-модуль. Інженер не збільшує товщину всього важеля, а лише редагує геометрію проблемного вузла. Він застосовує команду «Галтель» (Fillet), замінюючи гострий внутрішній кут на плавне заокруглення певного радіуса.
2. Оновлення моделі. Інженер переходить назад у CAE-модуль. Програма автоматично перерозбиває сітку скінченних елементів з урахуванням нової плавної геометрії.
3. Повторна симуляція. Інженер знову запускає розрахунок удару. Силові лінії тепер плавно огинають галтель, не створюючи "затору". "Червона зона" на екрані зникає, змінюючись на безпечну жовто-зелену. Деталь визнається надійною без додавання жодного зайвого грама металу. Це ідеальний приклад ітеративного (циклічного) цифрового проєктування.

Кейс 2 (Криза маси: Топологічна оптимізація для аерокосмічної галузі)

Ситуація: Ви працюєте над проєктом космічного супутника. До рами потрібно прикріпити масивний оптичний прилад. Ваш конструктор спроектував класичний Г-подібний титановий кронштейн (кутник). За результатами віртуальних випробувань він витримує космічні перевантаження із запасом. Але маса цього суцільного шматка титану становить 5 кг. Відділ балістики вимагає: "Вивезення кожного кілограма на орбіту коштує десятки тисяч доларів. Ви маєте зменшити масу кронштейна на 40%, але він не повинен втратити жодного відсотка жорсткості, інакше оптика зіб'ється".

Завдання: Як фахівець із сучасних комп'ютерних методів моделювання, застосуйте алгоритм топологічної оптимізації (Генеративного дизайну). Поясніть логіку, за якою комп'ютер створить нову форму деталі, яка здаватиметься інопланетною (схожою на скелет птаха або коріння дерева), але ідеально вирішить поставлене завдання.

Очікуване рішення: Людина мислить правильними геометричними формами (куби, циліндри, площини). Природа і комп'ютер мислять силовими лініями.

Логіка топологічної оптимізації:

1. Інженер задає в CAE-системі вихідний Г-подібний титановий кубик (область оптимізації).
2. Він фіксує незмінні зони (отвори для кріплення приладу і рами).
3. Він задає навантаження і ставить комп'ютеру умову: "Прибрати 40% маси, але мінімізувати втрату загальної жорсткості".
4. Алгоритм починає серію симуляцій. Він шукає ділянки металу (скінченні елементи), які забарвлені в глибокий синій колір (тобто напруження в них нульові, метал "лінується" і працює як мертвий вантаж). Програма поступово, ітерація за ітерацією, "вирізає" ці неробочі зони. У результаті комп'ютер залишає лише ті "нитки" титану, по

яких безпосередньо передаються механічні зусилля. Кронштейн набуває ажурної, органічної (біонічної) просторової структури. Виготовити таку складну форму класичним фрезеруванням дуже важко, тому такі деталі виготовляють за допомогою промислових 3D-принтерів (адитивні технології). Цей метод є вершиною сучасної прикладної механіки.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з концептуальної перспективи терміни: *CAD-система*, *CAE-система*, *цифровий двійник (Digital Twin)*, *метод скінченних елементів (MCE)*, *топологічна оптимізація*, *кіберфізична система*, *біонічний дизайн*.
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові переваги проведення віртуальних краш-тестів у комп'ютерному середовищі порівняно з руйнуванням фізичних прототипів машин на полігоні.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Впровадження CAD/CAM систем нерозривно пов'язане з еволюцією обладнання — верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК).

- **Завдання:** Використовуючи доступну інженерну інформацію, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Поясніть концептуальний зв'язок: як тривимірна комп'ютерна геометрія деталі, створена інженером у CAD, перетворюється (через модуль CAM) на математичні координати (G-код). Чому без верстатів із ЧПК топологічно оптимізовані деталі складної криволінійної форми неможливо було б виготовити в металі традиційними методами ручного точіння?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Смерть кульмана: як перехід до цифрового проєктування трансформував ментальність інженера-механіка».
2. «Жива математика міцності: як метод скінченних елементів зробив невидиму фізику деформацій видимою».
3. «Комп'ютер як співавтор: філософія генеративного дизайну та створення механізмів майбутнього».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології цифрового інжинірингу та розуміння фізико-математичної логіки процесів (MCE, оптимізація) під час аналізу сучасних методів проєктування — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання фахових комп'ютерно-аналітичних кейсів (ліквідація концентраторів напружень віртуально, керування масою) без використання розрахункових формул — **40 балів**.
- Якість, професійна зрілість та здатність екстраполювати можливості CAD/CAE систем на вирішення глобальних проблем економії ресурсів та екології у творчому есе — **30 балів**.

ТЕМА 15: Роль інженера-механіка у повоєнній відбудові та реставрації техніки (оцінка міцності пошкоджених конструкцій)

Обсяг часу: 2 академічні години (90 хв). **Вид заняття:** Семінар-практикум з елементами історико-інженерного аналізу, вивчення методів неруйнівного контролю (дефектоскопії) та фахового кризового кейс-методу.

1. АКАДЕМІЧНА МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЗАНЯТТЯ

1. **Дидактична:** Проаналізувати сучасні виклики промислової інженерії в умовах воєнного часу та ліквідації наслідків руйнувань. Дослідити методи прикладної механіки для оцінки залишкового ресурсу та міцності будівельних металоконструкцій і машинобудівного обладнання, що зазнали екстремальних динамічних (вибухових) або термічних навантажень.

2. **Методологічна:** Сформувати у студентів спеціальності «Прикладна механіка» навички якісного аналізу "історії навантаження" пошкодженого металу. Навчити концептуально описувати принципи роботи дефектоскопії (ультразвукової, магнітопорошкової) та специфіку зварюально-реставраційних робіт у польових умовах без використання математичних формул розрахунку міцності, спираючись на фізичну логіку та матеріалознавство.
3. **Соціально-адаптивна:** Використати контекст повоєнної відбудови для формування найвищого рівня громадянської відповідальності та інженерної етики. В умовах trauma-informed підходу (педагогіки, обізнаної з травмою) продемонструвати слухачам, що інженер-механік є головним гарантом безпеки суспільства при поверненні до мирного життя, а його принциповість у питаннях вибракування пошкоджених конструкцій рятує людські життя.

2. ПЛАН ПРОХОДЖЕННЯ ЗАНЯТТЯ (ХРОНОМЕТРАЖ)

1. **Організаційно-вступна частина (10 хв):** Актуалізація опорних знань. Зміна парадигми інженерного мислення: від проєктування ідеального нового до оцінки виживання пошкодженого старого.
2. **Теоретичний блок (20 хв):** Інженерія екстремальних навантажень. Фізика впливу вибухової хвилі та пожежі на структуру сталі. Методи неруйнівного контролю (NDT) як "рентген" для металоконструкцій.
3. **Дослідницький блок (20 хв):** Робота з інженерно-історичними першоджерелами. Аналіз досвіду Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона щодо відбудови мостів та відновлення техніки.
4. **Практичний блок / Кейс-стаді (25 хв):** Розв'язання фахових кризових задач (експертиза обгорілого промислового цеху, польовий ремонт бронетехніки та зварювання високолегованих сталей).
5. **Підсумковий блок (15 хв):** Рефлексія, оцінювання навчальних досягнень (за 100-бальною шкалою), видача багаторівневого самостійного завдання.

3. ХІД ЗАНЯТТЯ

БЛОК А: ТЕОРЕТИЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ІНЖЕНЕРНО-МЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ

Слово викладача: «У мирний час головним завданням інженера є проєктування нових механізмів із заздалегідь відомим запасом міцності. Війна ж змушує інженера працювати з невідомістю. Коли ви заходите в напівзруйнований промисловий цех або оглядаєте пошкоджену осколками турбіну електростанції, перед вами об'єкт, який зазнав навантажень, не передбачених жодними будівельними нормами. Вибух — це колосальний імпульсний динамічний удар, який може миттєво позбавити жорстку сталеву колону стійкості. Пожежа випалює з металу його властивості, незворотно змінюючи кристалічну решітку. У цій ситуації інженер-механік стає "лікарем" для техніки та інфраструктури. Наша мета — навчитися "бачити крізь метал" за допомогою методів дефектоскопії, розуміти приховану втому матеріалів та ухвалювати складні етичні рішення: що можна безпечно підсилити і відновити, а що підлягає безумовному демонтажу заради безпеки людей».

Таблиця 1. Інженерний аналіз пошкоджень та методів оцінки залишкового ресурсу

Фактор впливу / Метод	Фізико-механічна сутність проблеми	Інженерне рішення (Дефектоскопія та відновлення)
Вибухова хвиля (Динамічний удар)	Миттєве, імпульсне докладання колосальної сили. Сталеві двотаври чи фєми втрачають стійкість (вигинаються), а жорсткі зварні шви можуть розірватися через крихкий злам. Осколки створюють пробоїни — жорсткі концентратори напружень.	Ультразвукова дефектоскопія (УЗД). Пошук прихованих внутрішніх відривів. Звукова хвиля високої частоти відбивається від будь-якої мікротріщини в металі. Інженер за допомогою осцилографа точно визначає глибину і розмір невидимого оку дефекту.
Високотемпературна деградація (Пожежа)	При нагріванні понад певну межу конструкційна сталь	Відбір кернів (зразків) для лабораторного аналізу структури

	критично втрачає границю текучості (несучу здатність). Метал починає пластично "текти" під власною вагою. Різке охолодження водою може призвести до небажаного загартування і крихкості.	зерна. Якщо метал пройшов фазові перетворення і втратив пластичність, деталь бракується. Якщо зміна лише геометрична — проектується система дублюючих опор.
Поверхнева втома металу (Після екстремальних вібрацій)	На поверхні металу або в зоні термічного впливу зварних швів утворюються мікроскопічні тріщини, які з часом проростають вглиб, загрожуючи раптовим руйнуванням під час подальшої експлуатації.	Магнітопорошковий метод. На деталь накладають магнітне поле і посипають феромагнітним порошком. Лінії поля викривляються над мікротріщиною, і порошок яскраво окреслює контур невидимого дефекту.
Реставрація зварюванням	Відновлення суцільності деталей. Вимагає зняття залишкових напружень навколо старих пробоїн.	Встановлення металевих накладок (косинок, бандажів) з використанням пластичних електродів та попереднього підігріву для запобігання появі нових термічних тріщин.

БЛОК Б: ДОСЛІДНИЦЬКИЙ АНАЛІЗ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

Завдання для слухачів: Проаналізуйте історичні та технічні свідчення щодо роботи інженерів-механіків в екстремальних умовах відбудови. Зробіть висновки про важливість неруйнівного контролю.

Документ 1: Зі спогадів інженерів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона про повосенну відбудову мостів (середина XX ст.)

«Коли ми прийшли відновлювати підірвані мости через Дніпро, перед нами лежали купи понівеченого металу. Старі клепані ферми були розірвані вибухівкою. Багато хто пропонував просто вирізати автогеном рвані краї і зварити балки встик. Але Євген Оскарович Патон категорично заборонив це робити. Він довів, що метал навколо місця вибуху зазнав шокowego наклепу (зміцнення з втратою пластичності) і переповнений прихованими мікротріщинами. Якщо приварити до нього нову деталь, то під навантаженням потяга міст неминуче лусне саме в цій зоні, поруч зі швом. Ми були змушені відступати від місця розриву на значну відстань, вирізати "хворий" метал і лише тоді накладати зварні шви».

Документ 2: Витяг із сучасного протоколу оцінки стану металоконструкцій після пожежі
«Візуального огляду обвугленої сталеві колони категорично недостатньо для прийняття рішення про її придатність. Якщо колір окалини свідчить про нагрівання вище критичної точки кристалізації, а подальше гасіння спричинило нерівномірне охолодження, у структурі виникають колосальні залишкові термічні напруження. Інженер зобов'язаний провести твердометрію (вимірювання твердості) безпосередньо на об'єкті та ультразвукове дефектоскопіювання зварних вузлів. Лише комп'ютерна симуляція (МСЕ) з новими (зниженими) характеристиками металу може дати відповідь щодо залишкового ресурсу споруди».

Питання для експертної дискусії (Спеціальність G9 «Прикладна механіка»):

- Матеріалознавчий аспект:** Проаналізуйте рішення Є.О. Патона (Документ 1). Поясніть фізичну суть явища «шокowego наклепу» від вибуху. Чому метал, який став твердішим, є небезпечнішим для конструкцій, що працюють на вібрацію та згин (таких як міст), і чому необхідно вирізати цю зону перед зварюванням?
- Технологія дефектоскопії:** У Документі 2 вимагається використання неруйнівного контролю. Як інженер за допомогою портативного твердоміра (вимірювання відскоку кульки або вдавлення алмазного конуса) може прямо на згарищі визначити, чи перетворилася конструкційна сталь на крихкий матеріал після пожежі?

3. **Етико-правовий аспект:** Чому візуальний огляд після екстремального впливу вважається інженерною недбалістю? Яку морально-правову відповідальність несе інженер-механік, якщо він підпише акт про надійність машини або каркасу без інструментальної фіксації прихованих внутрішніх дефектів?

Еталон відповіді викладача:

1. Вибух створює надвисокий тиск, який миттєво пластично деформує метал. Це призводить до наклепу: кристалічна решітка спотворюється, метал стає твердішим, але повністю втрачає свою пластичність і в'язкість (здатність гнутися). Такий метал стає крихким, як скло. Вібрації від потяга миттєво пустять тріщину через цю крихку зону. Тому інженер зобов'язаний видалити деградований метал до зони, де сталь зберегла свою природну молекулярну структуру.
2. Твердість металу безпосередньо пов'язана з його кристалічною структурою. Якщо під час пожежі сталь сильно нагрілася, а потім була швидко охолоджена водою пожежників, міг відбутися неконтрольований процес гартування з утворенням надтвердих і крихких структур (мартенситу). Портативний твердомір покаже аномально високе значення твердості. Для інженера-будівельника це сигнал тривоги: така балка не витримає динамічних навантажень і трісне.
3. Візуальний огляд бачить лише поверхню. Тріщини в металі зароджуються і поширюються всередині деталі. Інженер, який ігнорує ультразвукову або магнітопорошкову дефектоскопію, діє наосліп. У разі обвалу або аварії, підпис інженера на акті експертизи означає його пряму кримінальну відповідальність за наслідки. Етика вимагає абсолютного пріоритету життя людини над швидкістю чи дешевиною відбудови.

БЛОК В: РОЗВ'ЯЗАННЯ ФАХОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ КЕЙСІВ (Кейс-стаді)

Кейс 1 (Цивільна інженерія: Експертиза обгорілого промислового цеху)

Ситуація: Ви — інженер-експерт. Після ліквідації масштабної пожежі на промисловому підприємстві (внаслідок влучання) вам потрібно оцінити стан несучого сталевих каркаса (масивні колони та двотаврові ферми перекриття). Метал чорний від кіптяви. Візуально деякі балки перекриття прогнулися вниз на кілька десятків сантиметрів, але не впали. Інвестор вимагає: "Просто зачистіть сажу піскоструменем, пофарбуйте, підпріть прогнуті балки домкратами, вирівняйте їх і будемо працювати далі, щоб не витратити гроші на новий метал".

Завдання: Спираючись на засади опору матеріалів та теорії пластичності, аргументовано відхиліть небезпечну пропозицію інвестора. Поясніть процеси, що відбулися в прогнутих балках, і розробіть єдиний безпечний алгоритм відновлення стійкості цеху.

Очікуване рішення: Вирівнювання (рихтування) масивних несучих балок, які прогнулися від високих температур, є злочином.

Фізика процесу: Прогин балки на десятки сантиметрів означає, що метал перейшов межу пружності і зазнав глибокої незворотної пластичної деформації (внутрішні зв'язки розірвані). Якщо цю балку спробувати "вигнути назад" холодним способом за допомогою домкратів, у металі виникнуть колосальні залишкові напруження, і він гарантовано лусне (подібно до дроту, який згинають туди-сюди).

Інженерний алгоритм: Прогнуті балки не підлягають відновленню — вони повністю втратили свою несучу здатність і мають бути демонтовані (вирізані). Щодо вертикальних колон, які візуально рівні, інженер призначає ультразвукову товщинометрію та магнітний контроль зварних швів. Для відновлення каркаса проектується встановлення нових сталевих елементів або наварювання потужних дублювальних (підсилювальних) бандажів на ті колони, які за даними дефектоскопії зберегли свою внутрішню кристалічну цілісність.

Кейс 2 (Реставрація техніки: Польовий ремонт бронемашини)

Ситуація: У вас польова ремонтна майстерня. Привезли пошкоджену бронемашину. У сталевому бронекорпусі є пробоїна від осколка розміром з долоню, навколо якої пішли променеподібні тріщини. Ваше завдання — заварити пробоїну (поставити латку), щоб повернути машину в стрій. Броня — це високолегована сталь із високим вмістом вуглецю, яка надзвичайно примхлива до термообробки. Звичайний зварювальник каже: "Зараз я швидко заварю дірку звичайними електродами, метал охолоне на морозі, і машина поїде".

Завдання: Як фахівець із сучасного зварювального виробництва, поясніть, чому такий швидкий ремонт призведе до того, що під час першого ж пострілу або удару латка просто вивалиться разом зі швом. Опишіть правильний технологічний цикл польового зварювання броньових сталей, щоб уникнути "холодних тріщин".

Очікуване рішення: Високовуглецева та високолегована броньова сталь є дуже схильною до утворення гартувальних структур (крихкого мартенситу) при різкому охолодженні. Якщо зварити холодну броню і залишити її остигати на морозі, величезна різниця температур призведе до миттєвого стягування металу. Виникнуть термомеханічні напруження, які порвуть крихкий шов (це і є явище "холодних тріщин"). Крім того, не можна варити поверх старих тріщин.

Правильний технологічний цикл:

1. **Локалізація:** Інженер засвердлює кінці всіх променеподібних тріщин навколо пробойни, щоб зупинити їх подальше поширення. Рвані краї пробойни акуратно зрізаються шліфмашиною до рівного контуру.
2. **Підігрів:** Зона зварювання обов'язково попередньо підігрівається (газовим пальником) до 150-200 градусів, щоб зменшити температурний градієнт (різницю температур між розплавленим швом і холодною бронею).
3. **Зварювання:** Використовуються спеціальні пластичні (часто аустенітні) електроди, які здатні поглинати напруження металу, що усаджується.
4. **Повільне охолодження:** Після зварювання шов накривається термоізоляційним матеріалом, щоб метал остигав дуже повільно, що запобігає утворенню крихких структур. Тільки такий підхід гарантує безпеку екіпажу.

4. САМОСТІЙНА ТА ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА (ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ)

1. Академічний мінімум (Робота з термінологією):

- Виписати у фаховий глосарій та засвоїти з інженерної перспективи терміни: *ультразвукова дефектоскопія, магнітопорошковий контроль, границя текучості, залишкові термічні напруження, мартенсит, холодні тріщини, шоківий наклеп, концентратор напружень.*
- Описати у вигляді таблиці 3 ключові відмінності в призначенні ультразвукового (внутрішнього) та капілярного/магнітного (поверхневого) методів неруйнівного контролю.

2. Аналітичне завдання (Інженерний звіт):

Сучасна концепція повоєнної відбудови базується на принципі «Build Back Better» (Відбудувати краще, ніж було).

- **Завдання:** Використовуючи знання з прикладної механіки та теорії удару, напишіть короткий аналітичний звіт (0,5 сторінки). Дослідіть концепцію пасивних захисних споруд (наприклад, габіонів або багат шарових металевих екранів для захисту трансформаторів). Поясніть логіку перетворення енергії: як руйнування (контрольоване зминання) зовнішнього захисного шару (демпфера) гасить кінетичну енергію осколків або вибухової хвилі, рятуючи дороге внутрішнє обладнання?

3. Творче завдання (Есе): Обсяг: 1–1,5 сторінки формату А4. Теми на вибір (суворо в контексті спеціальності G9 «Прикладна механіка»):

1. «Дефектоскопія як інженерна медицина: етична відповідальність фахівця за оцінку прихованих пошкоджень металу».
2. «Відновити неможна демонтувати: моральні та технічні дилеми інженера під час ліквідації наслідків техногенних катастроф».
3. «Польова інженерія: як глибоке розуміння металознавства та технологій зварювання повертає техніку до життя в екстремальних умовах».

Критерії оцінювання семінарського заняття (Максимум 100 балів):

- Точність у використанні термінології прикладної механіки, дефектоскопії та зварювального виробництва під час аналізу пошкоджених конструкцій — **30 балів**.
- Логічність, послідовність та інженерна інтуїція під час розв'язання кризових фахових кейсів (експертиза міцності, польовий ремонт) без застосування математичних формул — **40 балів**.

- Якість, професійна зрілість, патріотизм та усвідомлення власної ролі як гаранта безпеки суспільства у творчому есе — **30 балів**.