

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Григоруканський Андрій СТРИЛЕЦЬ

« 28 » Серпня 2026

ПОГОДЖЕНО

Заступник директора НДІ ЗПО «ДПТК»

Григоруканський Андрій СТРИЛЕЦЬ

Григоруканський Андрій СТРИЛЕЦЬ

АКАДЕМІЧНИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ІСТОРІЯ ТА КУЛЬТУРА УКРАЇНИ»

Спеціальність: G9 Прикладна механіка

МОДУЛЬ 1. ВІД ПРОСТИХ МЕХАНІЗМІВ ДО СКЛАДНОЇ КІНЕМАТИКИ: ВИТОКИ ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІКИ НА УКРАЇНСЬКИХ ЗЕМЛЯХ (ВІД АНТИЧНОСТІ ДО XV СТ.)

ЛЕКЦІЯ 1. ПРОСТІ МЕХАНІЗМИ (ВАЖЕЛІ, КЛИНИ, БЛОКИ) В БУДІВНИЦТВІ ТА ПОБУТІ АНТИЧНИХ ПОЛІСІВ ПІВНІЧНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я

Анотація: Лекція присвячена аналізу зародження базових принципів статичної та кінематики в епоху античності на теренах Північного Причорномор'я. Розглядається перехід від примітивної ручної праці до використання простих механізмів, які дозволили масштабувати будівельні проекти, оптимізувати енерговитрати та заклали емпіричний фундамент для розвитку сучасної прикладної механіки та інженерної справи.

Вступ. Зародження механіки як практичної науки для полегшення фізичної праці

Сучасна прикладна механіка, з її складними розрахунками кінематики машин, опору матеріалів та автоматизації процесів, бере свій початок з емпіричного досвіду стародавнього світу. В епоху античності, зокрема під час Великої грецької колонізації Північного Причорномор'я (VIII–VI ст. до н. е.), на теренах сучасної України (Ольвія, Херсонес, Пантікапей) відбувся якісний технологічний стрибок.

Цей період характеризується переходом від зведення легких тимчасових конструкцій до монументальної кам'яної архітектури, розбудови портової інфраструктури та потужних оборонних систем (фортифікації). Зведення таких об'єктів вимагало переміщення багатотонних кам'яних блоків (квадрів), що робило використання виключно м'язової сили людини чи тварин вкрай неефективним і ресурсомістким. Саме ця критична практична потреба стала каталізатором розвитку **простих механізмів** — перших пристроїв, призначених для перетворення сили та зміни напрямку її дії.

Для сучасного фахівця з прикладної механіки розуміння еволюції цих первісних технологій є принциповим. Це дозволяє досягнути базові закони статичної та кінематики не як сухі математичні формули, а як історично обумовлені інженерні рішення, що змінили парадигму людської праці, дозволивши зводити масштабні об'єкти з мінімальними енерговитратами.

Розділ 1. Ознайомлення з базовими принципами статичної та кінематики стародавнього світу

Стародавня Греція, колоніями якої були поліси Північного Причорномор'я, стала колыскою теоретичної та практичної механіки. Видатні мислителі та інженери античності, серед яких архімед Сіракузький, Герон Александрійський та Філон Візантійський, вперше сформулювали та систематизували знання про так звані "п'ять простих механізмів": **важіль, клин, похила площина, блок (поліспаст) та гвинт**.

Кінематика античності базувалася на інтуїтивному та емпіричному розумінні передачі руху. Античні інженери досліджували, як обертовий рух ворота чи блоку трансформується у прямолінійний поступальний рух вантажу, що підіймається. Вони ще не оперували сучасними

поняттями швидкості, прискорення чи крутного моменту в їхньому математичному вираженні, проте блискуче застосовували закон збереження роботи (золоте правило механіки): **"У скільки разів ми виграємо в силі, у стільки ж разів програємо у відстані"**.

Статика античності була більш розвиненою. Архімед математично обґрунтував закон важеля (умову рівноваги), який став наріжним каменем усієї античної інженерії. Розуміння центрів ваги масивних кам'яних блоків, умов їхньої рівноваги на похилій площині та розподілу навантажень в арокних конструкціях (наприклад, у склепіннях Пантікапей) вимагало глибоких знань з геометричної статистики.

Важливо зазначити: Майстри античних міст-держав Північного Причорномор'я були не просто сліпими виконавцями наказів з метрополій; вони адаптували ці механізми до місцевих умов, специфіки будівельних матеріалів (зокрема, обробки місцевого вапняку) та особливостей логістики.

Розділ 2. Аналіз використання важелів та похилих площин у містобудуванні (Ольвія, Херсонес)

Античні поліси, такі як Ольвія та Херсонес Таврійський, проєктувалися за строгою ортогональною (гіпподамовою) системою планування. Зведення оборонних мурів, храмів на акрополях, а також інженерних комунікацій (кам'яних водовідвідних колекторів та резервуарів) вимагало переміщення величезних мас каменю (переважно вапняку).

2.1. Похила площина як основний засіб подолання гравітації

Похила площина (земляний або дерев'яний пандус) була найпростішим, але наймасштабнішим механізмом, що використовувався під час будівництва.

- **Принцип дії:** Замість того, щоб підіймати кам'яний блок вагою у кілька тонн вертикально (що вимагало б неймовірних зусиль або надскладних підйомних кранів), блок тягнули вгору по похилій площині. Згідно із законами статистики, сила тяги, необхідна для рівномірного переміщення вантажу по ідеально гладкій площині, є пропорційною до синуса кута нахилу. Тобто, чим пологіший пандус, тим менше зусилля потрібно докласти.
- **Практична реалізація:** В Херсонесі під час зведення потужних оборонних стін (товщиною 3-4 метри, побудованих за технологією панцирної кладки), насипалися масштабні земляні пандуси. По мірі зростання стіни висота пандуса збільшувалася. Камінь не тягнули безпосередньо по землі; для зменшення коефіцієнта тертя ковзання використовували котки (обкоровані стовбури дерев) або спеціальні дерев'яні санки (волокуші), полози яких змащували тваринним жиром.

2.2. Важіль (Лом і Вага) в позиціонуванні блоків

Якщо похила площина забезпечувала глобальне переміщення вантажу, то важіль був незамінним для точного позиціонування багатотонних квадратів (тесаних кам'яних блоків) у кладці.

- **Принцип дії:** Важіль першого роду — це жорсткий стрижень, що обертається навколо нерухомої точки опори. Прикладаючи порівняно невелике зусилля до довгого плеча важеля, будівельники могли створювати величезний момент сили на короткому плечі, підіймаючи та зсуваючи камінь.
- **Інженерні інструменти:** Античні будівельники використовували масивні бронзові (згодом залізні) лом-важелі. У кам'яних блоках Ольвії та Херсонеса археологи часто знаходять спеціальні пази та гнізда (так звані "монтажні гнізда"). У ці гнізда вставлявся кінець металевого лома, що слугував важелем; спираючись на вже укладений нижній камінь (або спеціальну дерев'яну підкладку — точку опори), майстер міг з ювелірною точністю присунути блок до сусіднього, забезпечуючи ідеальне прилягання у так званій сухій кладці (без використання розчину).

Розділ 3. Системи блоків і поліспаствів: технологічний прорив у вертикальному підйомі (Пантікапей)

Розвиток монументальної архітектури, зокрема будівництво монументальних храмів на акрополях та унікальних курганных поховань (наприклад, Царський курган у Пантікапеї зі складним кам'яним склепінням уступчастого типу), потребував більш досконалих вантажопідйомних механізмів, здатних підіймати блоки на значну висоту.

3.1. Еволюція від простого блока до поліспасти

- **Нерухомий блок:** Найпростіший механізм, що являє собою колесо із жолобом (шківом) по ободу, закріплене на осі. Нерухомий блок не дає виграшу в силі (зусилля дорівнює вазі вантажу), але дозволяє зручно змінити напрямок тяги (наприклад, тягнути мотузку вниз, щоб підняти вантаж вгору).
- **Рухомий блок:** Блок, вісь якого опускається і підіймається разом із вантажем. Згідно з кінематикою механізму, він дає виграш у силі вдвічі, проте при цьому довжина витягнутої мотузки збільшується вдвічі (золоте правило механіки).
- **Поліспаст (від грец. polyspaston — «такий, що тягнеться багатьма мотузками»):** Це система, що складається з комбінації нерухомих і рухомих блоків, послідовно огинаних канатом. Саме поліспаст став справжнім технологічним проривом античної інженерії. Комбінуючи кілька блоків у єдину систему (обойму), інженери досягали багаторазового виграшу в силі (теоретичний виграш дорівнює кількості гілок каната, на яких висить рухома обойма блоків).

3.2. Античні підйомні крани

Поліспасти стали «робочим органом» перших в історії вантажопідйомних кранів, які активно застосовувалися в портах (для розвантаження амфор та товарів) та на будівництві монументальних споруд Пантікапея та Ольвії.

Античні інженери розробили кілька типів кранів (зокрема, описаних Вітрувієм):

1. **Триног (Trispastos):** Складався з двох похилих дерев'яних щогл, з'єднаних угорі, та поліспасти з трьома шківом (давав виграш у силі в 3 рази). Тяга забезпечувалася за допомогою коловорота (ворота) — дерев'яного валу з руків'ями.
2. **Поліспаст із ступальним колесом (Polyspastos / Pentaspastos):** Для підйому особливо важких монолітів (наприклад, колон храмів або масивних плит перекриття гробниць) використовували крани з п'ятьма шківом. Замість ручного коловорота тягловим механізмом слугувало величезне "ступальне колесо" (барабан діаметром 4-6 метрів). Кілька робітників заходили всередину цього колеса і, переступаючи по сходинках, змушували його обертатися, намотуючи канат на вісь. Це геніальне застосування біомеханіки людини та закону важеля (великий радіус колеса до малого радіуса осі намотування каната) дозволяло створювати колосальний крутний момент.

Завдяки цим механізмам, майстри Північного Причорномор'я могли монтувати важкі архітравні балки, зводити складні кам'яні склепіння царських курганів та будувати кораблі у портових доках.

Розділ 4. Зародження механіки як науки: від оптимізації зусиль до інженерної етики

Використання простих механізмів у полісах Північного Причорномор'я не обмежувалося лише будівництвом. Клини використовувалися в каменоломнях для розколювання породи (у висвердлені отвори забивали сухі дерев'яні клини і поливали їх водою; набухаючи, дерево створювало величезний тиск, що розривав камінь). Гвинти (зокрема, Архімедів гвинт) застосовувалися у гідротехніці для підйому води.

Ця епоха заклала фундаментальні основи, необхідні для формування прикладної механіки як науки:

1. **Перехід від емпірики до розрахунку:** Будівельники почали усвідомлювати, що міцність споруди чи ефективність механізму залежить не лише від м'язової сили, а від правильної геометрії, співвідношення плечей важеля та розподілу навантажень.
2. **Стандартизація та оптимізація:** Масове використання блоків та поліспастів вимагало стандартизації кріплень, канатів та дерев'яних конструкцій, що є першим кроком до сучасного конструювання машин.
3. **Соціальний та етичний вимір інженерії:** Механізми суттєво зменшили рівень травматизму та смертності під час виконання надважких робіт. Оптимізація фізичних зусиль дозволила полісам вивільнити людські ресурси для розвитку ремесел, торгівлі та демократичних інститутів (зокрема, функціонування народних зборів та магістратур, таких як астиноми, що контролювали якість будівництва).

Висновки

Зародження механіки в античних містах-державх Північного Причорномор'я є першим потужним доказом того, що еволюція людства нерозривно пов'язана з еволюцією техніки. Застосування важелів, клинів, похилих площин та складних блокових систем (поліспастів) під час зведення монументальних споруд Ольвії, Херсонеса та Пантікапея продемонструвало тріумф людського інтелекту над гравітацією.

Для сучасного студента спеціальності "Прикладна механіка" вивчення цих ранніх кінематичних та статичних систем є не просто екскурсом в історію, а можливістю зрозуміти саму природу інженерної думки: здатність аналізувати проблему, знаходити раціональне рішення для оптимізації фізичної праці та створювати технології, що стають фундаментом для розвитку цивілізації. Саме на цих античних принципах (перетворення обертового руху на поступальний, закон важеля) сьогодні базується робота сучасних кранів, екскаваторів, роботизованих комплексів та систем автоматизації машинобудівних підприємств.

ЛЕКЦІЯ 2. БІОМЕХАНІКА ТА ТЯГЛОВА СИЛА: ВИКОРИСТАННЯ ТВАРИН І ПЕРШИХ МЕХАНІЧНИХ ПРИСТОСУВАНЬ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Анотація: Лекція присвячена інженерному аналізу першої енергетичної революції в історії людства — переходу від мускульної сили людини до використання тягової сили тварин. Розглядаються фундаментальні закони біомеханіки, що зумовили еволюцію упряжі (ярма та хомута), а також аналізується кінематика та статика перших транспортних засобів і ґрунтообробних знарядь ранніх слов'ян. Матеріал адаптовано для розуміння історичних витоків конструювання сільськогосподарських машин та транспортної логістики.

Вступ. Біомеханіка як фундамент ранньої інженерної думки

У контексті прикладної механіки розвиток аграрного суспільства є історією неперервного пошуку нових джерел енергії та засобів її ефективного перетворення. Мускульна сила людини має жорсткі біологічні ліміти: середня довготривала потужність, яку може генерувати людина, становить близько 0,1 кінської сили (приблизно 75 Вт). Цього було вкрай недостатньо для глибокого обробітку важких чорноземів та лісостепових ґрунтів на теренах сучасної України. Залучення великої рогатої худоби (волів), а згодом і коней, стало першим в історії випадком використання зовнішнього, "нелюдського" джерела механічної енергії. Однак проста наявність тварини не гарантує виконання корисної роботи. Щоб перетворити біологічну енергію м'язів тварини на механічну тяглову силу, необхідний був проміжний передавальний механізм — **упряж**.

Для сучасного інженера еволюція упряжі та сільськогосподарських знарядь — це класичний приклад вирішення задачі з оптимізації передачі зусилля, мінімізації втрат на тертя та врахування опору матеріалів (у цьому випадку — властивостей ґрунту та деревини).

Розділ 1. Дослідження еволюції упряжі: кінематика передачі тягового зусилля

Ефективність тягової тварини залежить не лише від її абсолютної фізичної маси, але й від того, наскільки правильно вектор сили тяги розподіляється по її скелетно-м'язовому апарату. Рання інженерна думка вирішила цю проблему шляхом створення двох принципово різних типів упряжі: ярма та хомута.

1.1. Механіка ярма: оптимізація для великої рогатої худоби

Ярмо — це найдавніший жорсткий дерев'яний механізм, призначений переважно для парного запрягання волів.

- **Біомеханічний принцип:** Анатомія вола (корови) характеризується надзвичайно потужним шийним відділом хребта, низькою посадкою голови та рівною лінією хребта при русі. Ярмо (головне або шийне) жорстко фіксувалося перед холкою тварини.
- **Векторний аналіз:** Вектор сили тяги передавався безпосередньо від масивної шиї вола через жорстке дерев'яне дишло до воза чи рала. Ця система була ідеальною для повільного, але потужного тягового зусилля з високим крутним моментом при низькій швидкості.
- **Інженерні недоліки:** Ярмо є неефективним для коня. Через анатомічні особливості (високий вихід шиї та інша будова грудної клітки) шийне ярмо при збільшенні навантаження тисне на трахею (дихальне горло) та яремні вени коня. З погляду

механіки, при зростанні сили опору (наприклад, плуг натрапив на корінь), кінь у ярмі починає задихатися, і його тяглова ефективність (ККД) падає до 15-20%.

1.2. Революція хомута: перерозподіл епюри напружень

Справжнім проривом у біомеханіці та транспортній логістиці, що відбувся в період раннього Середньовіччя (і активно використовувався слов'янськими племенами), став винахід **хомута**.

- **Конструктивна схема:** Хомут — це жорсткий овал (кліщі), який спирається не на шию, а на лопатки (плечовий пояс) коня. Внутрішня частина хомута має м'яку підкладку (хомутину) для рівномірного розподілу тиску на площу тіла тварини.
- **Біомеханічна ефективність:** Хомут кардинально змінює епюру напружень. Вектор тягової сили тепер передається від найміцніших м'язів грудей та лопаток через гужі до голобель воза. Трахея коня залишається вільною, що дозволяє системі дихання працювати на повну потужність.
- **Інженерний наслідок:** Завдяки хомуту кінь зміг перемістити центр ваги вперед і використовувати для тяги всю масу свого тіла та поштовхову силу задніх кінцівок. Тяглова ефективність коня зросла у 3-4 рази порівняно з античною упряжжю. Це дозволило збільшити не лише масу вантажу, а й швидкість його транспортування, що здійснило революцію у логістиці та обробітку землі.

Розділ 2. Механіка найдавніших транспортних засобів: від тертя ковзання до тертя кочення

Розвиток сільського господарства та необхідність переміщення надлишків продукції вимагали створення ефективних транспортних механізмів. Інженерна еволюція йшла шляхом мінімізації втрат енергії на подолання сил тертя.

2.1. Сани (волокуші): експлуатація тертя ковзання

Історично першим транспортним засобом були сани (волокуші). Помилково вважати, що вони використовувалися лише взимку. У болотистій та лісистій місцевості ранніх слов'ян сани активно застосовувалися цілорічно.

- **Фізика процесу:** Робота саней базується на терті ковзання. Сила тертя прямо пропорційна масі вантажу та коефіцієнту тертя між полозами і поверхнею ($F = \mu \cdot N$).
- **Інженерне рішення:** Волокуші мали велику площу контакту з поверхнею (полози), що суттєво зменшувало питомий тиск на ґрунт. На м'яких, заболочених ґрунтах або високій траві влітку коефіцієнт тертя ковзання був відносно низьким, а сани не "грузли" так глибоко, як вузькі колеса перших возів. Це класичний приклад адаптації механізму до складних геологічних умов.

2.2. Колісний віз: революція тертя кочення

Перехід до колісного транспорту (возів, маж) став переломним моментом у прикладній механіці.

- **Кінематика колеса:** Колесо трансформує тертя ковзання (яке тепер відбувається лише у невеликій зоні контакту маточини та осі) у тертя кочення по поверхні землі. Оскільки коефіцієнт тертя кочення в десятки разів менший за коефіцієнт тертя ковзання, енерговитрати тварини на переміщення тієї ж маси вантажу колосально зменшуються.
- **Еволюція конструкції:** Перші колеса були суцільними (вирізаними з масивних стовбурів), що робило їх надзвичайно важкими та інерційними. Згодом з'явилося колесо зі спицями — інженерний шедевр, який зберігав необхідну радіальну жорсткість та здатність витримувати динамічні навантаження (удари від нерівностей дороги), але при цьому мав значно меншу масу.
- **Опір матеріалів:** При конструюванні дерев'яних возів майстри інтуїтивно використовували знання з опору матеріалів. Осі та маточини (найбільш навантажені деталі, що працюють на стиск та зріз) виготовляли з твердих порід (дуб), спиці (працюють на поздовжній згин) — з пружного ясеня, а обід часто зміцнювали металевими шинами для зменшення зносу.

Розділ 3. Сільськогосподарські знаряддя: від кінематики розпушування до 3D-деформації ґрунту

Справжня революція в аграрній інженерії відбулася завдяки вдосконаленню ґрунтообробних знарядь. Завдання механіки тут полягало у подоланні колосального опору щільних ґрунтів з мінімальними витратами тяглової сили.

3.1. Рало: симетричний вплив на ґрунт

Рало — найдавніше тяглове знаряддя для обробітки землі.

- **Механіка дії:** Робочим органом рала є наральник (спочатку дерев'яний, пізніше — з металевим наконечником). З точки зору статички, наральник діє як **клин**. При русі вперед він розрізає верхній шар ґрунту і розсуває його симетрично в обидва боки.
- **Обмеження:** Рало лише розпушує землю, утворюючи V-подібну борозну. Воно не здатне перевернути пласт ґрунту (щоб знищити бур'яни та підняти поживні речовини з глибини). Кінематика рала — це переважно 2D-зміщення ґрунту. Для якісного обробітку поле доводилося орати кілька разів уздовж і впоперек, що було вкрай енергозатратним.

3.2. Плуг: асиметрична 3D-деформація пласта

Поява важкого колісного плуга стала одним із найвеличніших досягнень ранньої прикладної механіки. Плуг кардинально змінив кінематику взаємодії металу з ґрунтом.

- **Конструкція:** На відміну від симетричного рала, плуг має асиметричну конструкцію. Його головні робочі органи: **чересло** (вертикальний ніж, що відрізає пласт у вертикальній площині), **леміш** (горизонтальний клин, що підрізає пласт знизу) та **відвал** (спеціально вигнута поверхня).
- **Кінематика відвалу:** Відвал плуга — це геніальне інженерне рішення, що являє собою складну гвинтову (торсійну) 3D-поверхню. Коли леміш підрізає пласт ґрунту, цей пласт насувається на відвал. Завдяки кривизні відвалу пласт не просто відсувається вбік, а здійснює складний просторовий рух: підіймається, закручується навколо своєї осі на 135-180 градусів і падає перевернутим у попередню борозну.
- **Енергетична ефективність:** Така складна деформація вимагала значно більшого початкового тяглового зусилля (тому важкі плуги тягнули по 2-4 пари волів), проте якість обробітку була безпрецедентною. Перевертання пласта надійно ховало бур'яни і створювало ідеальну структуру ґрунту за один прохід, радикально підвищуючи врожайність. Крім того, наявність колісного передка в конструкції важкого плуга стабілізувала глибину оранки і розвантажувала руки орача, переводячи вертикальні коливання в обертальний рух коліс.

Розділ 4. Оцінка впливу біомеханічних рішень на розвиток аграрної економіки ранніх слов'ян

Впровадження передових для свого часу біомеханічних та кінематичних рішень (хомут, колісний транспорт, важкий відвальний плуг) мало ефект справжнього економічного вибуху, який трансформував суспільство ранніх слов'ян.

1. **Перехід до орного землеробства:** Здатність ефективно перевертати важкі пласти землі дозволила перейти від екстенсивного підсічно-вогневого землеробства (коли ліс спалювали, використовували ділянку кілька років і кидали) до інтенсивного орного землеробства (двопільна та трипільна системи). Земля стала оброблятися стабільно на одному місці.
2. **Генерація додаткового продукту:** Ефективність тяглової сили тварин та інноваційних плугів призвела до різкого збільшення врожайності. Утворився стабільний додатковий продукт (надлишок продовольства).
3. **Соціальна стратифікація та розвиток ремесел:** Наявність надлишку їжі дозволила частині населення відірватися від сільського господарства. Почав стрімко розвиватися фаховий поділ праці. Зокрема, виникла гостра потреба у професійних ковалях для масового виготовлення металевих лемешів, чересел та шин для коліс, що дало поштовх металургії та ковальській справі.
4. **Урбанізація та логістика:** Зниження енерговитрат на транспортування завдяки колісним возам та ефективній упряжі дозволило перевозити сільськогосподарську продукцію на значні відстані. Це стимулювало розвиток торгівлі, розбудову

торговельних шляхів та поступове перетворення укріплених городищ на справжні міста — центри ремесла та торгівлі.

Висновки

Дослідження еволюції упряжі, транспортних та сільськогосподарських механізмів ранніх слов'ян доводить, що розвиток економіки нерозривно пов'язаний із прогресом інженерної думки. Перехід від ярма до хомута, винахід колеса та створення 3D-геометрії відвалу плуга — це видатні досягнення в галузі прикладної механіки та біомеханіки.

Для сучасного фахівця з машинобудування та механіки цей історичний досвід є наочним уроком того, як глибоке розуміння фізики процесів (кінематики тертя, векторного розподілу зусиль, опору матеріалів) дозволяє оптимізувати енерговитрати і створювати технології, що стають фундаментом для економічного зростання та сталого розвитку суспільства. Принципи, закладені в першому колісному плузі чи маточині воза, продовжують жити у сучасних тракторах, роботизованих агрокомплексах та складних трансмісіях.

ЛЕКЦІЯ 3. ЗАРОДЖЕННЯ ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІКИ В РУСІ-УКРАЇНІ: РЕМІСНИЧІ МЕХАНІЗМИ, ГОНЧАРНЕ КОЛО, ПЕРШІ ТОКАРНІ ПРИСТРОЇ

Анотація: Лекція присвячена глибокому аналізу зародження прикладної механіки в епоху Київської Русі (IX–XIII ст.). Розглядається перехід від примітивного ручного інструменту до складних кінематичних систем. У фокусі — механіка перетворення рухів у традиційних ремеслах, інженерний аналіз ручного та ногоного гончарного кола (ефект маховика), а також кінематика і конструктивні особливості перших метало- та деревообробних верстатів (лучковий привід). Матеріал формує розуміння історичного фундаменту сучасного верстатобудування та теорії механізмів і машин.

Вступ. Ремісничі механізми як предтеча машинобудівної галузі

Епоха Київської Русі характеризувалася бурхливим розвитком міст (урбанізацією) та небувалим розквітом ремісничого виробництва. Міста, такі як Київ, Чернігів, Переяслав та Галич, стали потужними центрами, де функціонували десятки спеціалізованих ремісничих цехів: від ковальських та ювелірних майстерень до гончарних і деревообробних дворів.

Масове виробництво товарів вимагало радикального підвищення продуктивності праці та точності обробки матеріалів. Мускульна сила майстра, застосована безпосередньо до різця чи шматка глини, вже не могла забезпечити необхідної якості та обсягів. Виникла гостра технічна потреба у **механізації процесів**.

З точки зору сучасної прикладної механіки, саме в цей період відбувається епохальний перехід від використання простого інструменту до створення **перших верстатів**. Ремісники Русі-України емпіричним шляхом почали конструювати пристрої, що містили базові елементи сучасних машин: станину (основу), шпindel (обертний вал), підшипникові вузли (опори ковзання) та привідні механізми. Аналіз цих протомашин дозволяє простежити еволюцію інженерної думки від інтуїтивної кінематики до свідомого використання законів динаміки та збереження енергії.

Розділ 1. Принципи перетворення рухів у традиційних ремеслах Середньовіччя

Головним завданням ранньої прикладної механіки було перетворення природних, анатомічно зручних рухів людини (зазвичай лінійних зворотно-поступальних) на рухи, необхідні для технологічного процесу (переважно обертів).

1.1. Кінематичні пари та ланцюги раннього Середньовіччя

Будь-який механізм базується на кінематичних парах — рухомих з'єднаннях двох твердих тіл, що обмежують відносний рух. Ремісники Київської Русі успішно освоїли та впровадили в роботу:

- **Обертальні (циліндричні) кінематичні пари:** Вал, що обертається у дерев'яному або кам'яному гнізді (прототип підшипника ковзання). Використовувався у гончарних колах, токарних верстатах, жорнах.
- **Гвинтові пари:** Хоча металеві гвинти були рідкістю, дерев'яні гвинтові передачі починали застосовуватися в пресах для віджиму олії чи соку.

1.2. Проблема неперервності руху

Основною біомеханічною проблемою ремісника є те, що м'язи людини ефективно генерують зворотно-поступальний рух обмеженої амплітуди (наприклад, рух руки з пилкою або рух ноги на педалі). Для якісної обробки деталей (точіння, свердління, формування посуду) необхідний **неперервний обертовий рух**. Вирішення цієї кінематичної задачі стало можливим завдяки винаходу гнучких передач (лучковий привід) та використанню махових мас для акумуляції кінетичної енергії.

Розділ 2. Механіка обертового руху на прикладі ручного та ногоного гончарного кола

Гончарне виробництво Київської Русі досягло промислових масштабів. Якість виготовлення тонкостінного посуду прямо залежала від стабільності та плавності обертання заготовки. Це зумовило еволюцію гончарного кола від примітивної ручної підставки до складного кінематичного пристрою — ногоного кола.

2.1. Ручне гончарне коло: переривчаста кінематика

Ручне коло складалося з невеликого дерев'яного диска, насадженого на коротку вісь, що оберталося у гнізді підставки.

- **Кінематика:** Майстер обертав коло однією рукою, а іншою формував глину. Коли швидкість падала, він мусив відривати руку від заготовки, щоб знову розкрутити диск.
- **Механічні недоліки:** Відсутність значної маси означала низький момент інерції. Коло швидко зупинялося через тертя в опорі та опір глини (під час формування). Процес був переривчастим, що знижувало точність і симетрію виробів. Сила тертя в примітивному підшипнику ковзання (дерево по дереву) забирала лівову частку корисної роботи.

2.2. Ногоне гончарне коло: інженерний тріумф ефекту маховика

Перехід до ногоного гончарного кола став справжньою революцією у прикладній механіці X–XI ст., що дозволила майстрам Русі масово виробляти високоякісну стандартизовану кераміку.

- **Конструктивна схема:** Вертикальний дерев'яний вал (веретено) жорстко з'єднував два диски. Верхній (малий) диск слугував робочим столом для глини. Нижній (великий і масивний, часто діаметром до метра) дерев'яний диск розташовувався біля ніг гончара.
- **Фізика маховика:** Нижній масивний диск виконував функцію **маховика**. З точки зору динаміки обертального руху, кінетична енергія обертання визначається формулою $E_k = \frac{I\omega^2}{2}$, де ω — кутова швидкість, а I — момент інерції ($I = m \cdot R^2$ для диска). Завдяки великій масі та значному радіусу нижнього диска, система набувала колосального моменту інерції.
- **Кінематична перевага:** Гончар розкручував нижній диск ногами, передаючи йому кінетичну енергію. Набувши швидкості, маховик завдяки інерції продовжував стабільно і довго обертатися, долаючи опір глини під час формування.
- **Трибологія (наука про тертя):** Вал спирався на нижній п'ятниковий підшипник (опорний підшипник ковзання). Щоб масивна система не зупинялася миттєво, майстри використовували тверді породи дерева (дуб, бук) або камінь для п'ятника, та постійно змащували вузол тваринним жиром, зводячи коефіцієнт тертя ковзання до мінімуму.
- **Ергономіка:** Головний результат — у майстра звільнилися **обидві руки** для виконання складних просторових 3D-деформацій глини, що дозволило створювати тонкостінний, ідеально симетричний посуд.

Розділ 3. Конструктивні особливості перших примітивних токарних та свердлильних верстатів з лучковим приводом

Обробка твердих матеріалів (дерева, кістки, м'яких металів) вимагала створення пристроїв, що забезпечували б високу швидкість відносного руху між заготовкою та різальним інструментом. Майстри Київської Русі блискуче вирішили цю проблему, створивши перші токарні та свердлильні верстати.

3.1. Лучковий привід як перша механічна трансмісія

Основою перших метало- та деревообробних верстатів став **лучковий привід** — геніальний механізм перетворення зворотно-поступального лінійного руху на обертовий рух.

- **Кінематика приводу:** Привід складався з лука (гнучкої дерев'яної палиці) та тятиви (шкіряного ремня або міцної мотузки). Тятивою один або кілька разів обмотували шпindel верстата (або саму заготовку).

- **Перетворення руху:** Коли майстер (або його підмайстер) рухав лук вперед-назад, тягива, діючи за принципом фрикційної пасової передачі, змушувала шпindel обертатися. Оскільки рух лука був зворотно-поступальним, шпindel здійснював **зворотно-обертовий рух** (то в один бік, то в інший).

3.2. Механіка перших токарних верстатів

Токарний верстат став найвищим досягненням середньовічної механіки, впровадивши концепцію фіксації осі обертання та створення "зони різання".

- **Станина і Центри:** Основою верстата була жорстка дерев'яна станина. На ній кріпилися дві центрові бабки (часто дерев'яні стояки з металевими вістрями — центрами). Між цими центрами надійно затискалася заготовка (наприклад, шматок кістки для гребінця або дерев'яна балясина). Це позбавляло заготовку всіх ступенів вільності, окрім одного — обертання навколо власної поздовжньої осі.
- **Підручник:** Інноваційним елементом стала поява підручника — жорсткої опори для різця. Майстер уже не тримав різець у всячому положенні, а спирав його на підручник, що дозволяло точно дозувати зусилля різання і знімати тонку стружку без вібрацій (прототип сучасного супорта).
- **Особливість процесу різання:** Через зворотно-обертовий характер лучкового приводу, корисна робота (зрізання матеріалу) виконувалася лише під час руху заготовки на різець. При зворотному ході лука заготовка оберталася у зворотному напрямку, і майстер мусив трохи відводити різець, щоб не затупити його. Ця переривчаста кінематика була обмеженням, яке подолали лише згодом, винайшовши кривошипно-шатунний педальний привід.

3.3. Свердлильні верстати (Pump drill / Bow drill)

Для створення отворів у металі (елементи кольчуг, ювелірні вироби), кістці чи дереві використовували лучкові та насосні свердлильні пристрої.

- **Кінематика свердління:** Свердло насаджувалося на вертикальний шпindel. На шпindel обов'язково насаджувався невеликий важкий диск-маховик (пряслице). Маховик забезпечував інерцію та стабільність вертикальної осі під час інтенсивного обертання.
- **Фізика різання:** Лучковий привід дозволяв досягати дуже високих обертів (сотні обертів за хвилину), що в поєднанні з тиском зверху (через спеціальну опорну колодку, яку майстер міг притискати навіть грудьми) дозволяло металевому свердлу ефективно різати тверді матеріали.
- **Висновки**
- Зародження прикладної механіки в Київській Русі — це яскравий етап переходу людства від використання примітивних ручних інструментів до створення машин-знарядь. Впровадження гончарного кола з маховиком продемонструвало блискуче емпіричне володіння законами динаміки обертального руху та збереження моменту інерції. Водночас винахід токарного верстата з лучковим приводом заклав фундаментальні принципи машинобудування: фіксацію заготовки в центрах, створення жорсткої бази для різального інструменту (підручника) та механічну передачу руху (прототип трансмісії).
- Для сучасного фахівця спеціальності "Прикладна механіка" вивчення цих середньовічних механізмів є ключем до розуміння базових кінематичних схем. Усвідомлення того, як історично вирішувалися проблеми перетворення рухів, подолання тертя та стабілізації швидкості за допомогою маховиків, формує глибоке професійне мислення, необхідне для проектування сучасного високотехнологічного обладнання, верстатів з ЧПК та роботизованих комплексів.

ЛЕКЦІЯ 4. МЕХАНІКА ВІЙСЬКОВОЇ СПРАВИ: ОБЛОГОВІ МАШИНИ ТА МЕТАЛЬНА АРТИЛЕРІЯ СЕРЕДНЬОВІЧНОЇ ДОБИ

Анотація: Лекція розкриває інженерні засади створення метальної артилерії та облогових машин середньовіччя як перших складних динамічних систем. Здійснюється фізико-

математичний аналіз процесів накопичення та вивільнення потенційної енергії у торсіонних і гравітаційних машинах (катапультах, балістах, требюше). Розглядаються основи балістики, розрахунку траєкторій, а також вплив розвитку військової механіки на еволюцію оборонної архітектури та проєктування захисних споруд міст-фортець.

Вступ. Військова інженерія як каталізатор розвитку динаміки

Історія прикладної механіки нерозривно пов'язана з військовою справою. Потреба у руйнуванні монументальних оборонних споруд, які зводилися для захисту античних та середньовічних міст, вимагала створення пристроїв, здатних генерувати кінетичну енергію, що в сотні разів перевищувала можливості людини. Звичайні луки та пращі вже не могли завдати шкоди кам'яним мурам.

Виникнення догульмпаудерної (до появи пороху) металюї артилерії стало першим досвідом людства у проєктуванні механізмів, які цілеспрямовано працювали з великими динамічними навантаженнями. Для тогочасних інженерів (зодчих, майстрів-зброярів) створення облогової машини було складним завданням з опору матеріалів та кінематики: необхідно було накопичити величезну кількість енергії в пружних елементах або піднятій масі, а потім миттєво вивільнити її, не зруйнувавши при цьому саму конструкцію машини.

Вивчення цих пристроїв дозволяє сучасному фахівцеві спеціальності "Прикладна механіка" зрозуміти витoki теорії пружності, балістики та принципів перетворення потенційної енергії на кінетичну, які сьогодні лежать в основі розрахунків будь-яких ударних механізмів та пружинних акумуляторів.

Розділ 1. Торсіонні механізми (Балісти та Катапульти): Накопичення енергії пружної деформації

Найдавнішим та найбільш поширеним принципом дії античної та ранньосередньовічної артилерії був торсіонний механізм (від лат. *torsio* — скручування).

1.1. Фізика торсіонного акумулятора

Основою торсіонної машини є пучок пружних волокон (переважно використовували жили тварин, кінський волос або жіноче волосся, які попередньо вимочували в оліях для збереження еластичності).

- **Механіка процесу:** Пучок волокон жорстко закріплювався з обох кінців у масивній дерев'яній рамі. Крізь центр пучка просувався важіль (металюїй важіль катапульти або плече балісти). За допомогою спеціальних зубчастих коліс із храповиком волокна сильно скручували (закручували навколо власної осі).
- **Енергетика:** Під час скручування виконувалася механічна робота, яка переходила у потенційну енергію пружної деформації кручення пучка ($E = \frac{1}{2}k\theta^2$, де k — жорсткість пучка, θ — кут закручування). Після відпускання спускового гачка, пучок миттєво розкручувався, передаючи важелю колосальну кутову швидкість.

1.2. Баліста: двоплеча торсіонна машина (Настільна траєкторія)

Баліста (скорпіон) — це зброя прямого наведення, що нагадує велетенський арбалет, але працює не на згині дуги, а на скручуванні двох вертикальних торсіонних пучків.

- **Кінематика:** Баліста має два плеча, кожне з яких вставлене у власний торсіонний моток. Плечі з'єднані міцною тятивою. За допомогою коловорота тятиву відтягують назад по напрямній балці (повзуну), згинаючи плечі всередину і ще більше скручуючи торсіони. Снарядом слугували важкі залізні стріли (болти) або невеликі кам'яні ядра.
- **Балістика:** Машина забезпечувала колосальну початкову швидкість снаряда, що робило її ідеальною для настільної (майже прямолінійної) стрільби по живій силі на мурах або для пробивання дерев'яних воріт.

1.3. Катапульта (Онагр): одноплеча машина (Параболічна траєкторія)

Онагр працював на єдиному, але дуже товстому горизонтальному торсіонному пучку.

- **Динаміка пострілу:** У пучок вставлявся один довгий металюїй важіль. На кінці важеля кріпилася праща з кам'яним ядром. Важіль відтягували лебідкою вниз (майже до горизонталі). При спуску важіль стрімко летів вгору і вперед.
- **Проблема опору матеріалів:** Найбільшим інженерним викликом онагра була зупинка важеля. Він на величезній швидкості вдарявся у масивну поперечну балку (стопор), оббиту мішками з вовною. Цей динамічний удар був настільки потужним, що машина

підстрибувала під час пострілу (звідси назва "онагр" — дикий осел). Каркас катапульти виготовляли з дуба найвищої якості та скріплювали залізними скобами, інакше кінетична енергія удару просто розірвала б машину на шматки.

- **Балістика:** Онагр стріляв по високій параболичній траєкторії, перекидаючи важкі камені або запалювальні снаряди через високі міські мури для руйнування будівель всередині фортеці.

Розділ 2. Гравітаційні машини (Требюше): Тріумф статички та важеля

Торсіонні машини мали межу потужності — природні волокна не могли витримати скручування понад певну межу, а під впливом дощу чи вогкості вони втрачали пружність. Інженерною відповіддю на ці обмеження стало створення **требюше** (фрондиболи) — вершини розвитку металеві артилерії, що працювала виключно на законах гравітації та принципі важеля.

2.1. Механіка гравітаційного акумулятора

Требюше є класичним **важелем першого роду** з нерівними плечима, який обертається навколо горизонтальної осі на високій станині.

- **Коротке плече (Противага):** На дуже короткому кінці важеля шарнірно кріпиться величезний короб (противага), заповнений десятками тонн каменю або свинцю. Цей короб підіймають вгору за допомогою системи поліспастів та ступальних коліс. Тут запасється потенційна енергія маси у гравітаційному полі Землі ($E = m \cdot g \cdot h$).
- **Довге плече (Метальне):** Довге плече важеля у 4-6 разів довше за коротке. Воно опускається до землі, де до нього кріпиться снаряд.

2.2. Кінематика праці як мультиплікатора швидкості

Геніальність конструкції требюше полягає у використанні **праці**, яка прикріплена до кінця довгого важеля. Снаряд лежить не у фіксованій ложці (як в онагра), а у шкіряній сумці праці, що тягнеться по спеціальному жолобу під машиною.

- **Складний рух:** Коли противага падає, довге плече стрімко здійснюється. Спочатку праця тягне снаряд по жолобу (розгін). Коли важіль наближається до вертикалі, праця злітає вгору, діючи як **додаткове шарнірне плече важеля**.
- **Кутова швидкість:** Згідно з кінематикою, лінійна швидкість на кінці важеля $v = \omega \cdot R$. Праця фактично збільшує радіус R в останню мить перед кидком, надаючи снаряду (вагою від 50 до 150 кг) гігантської швидкості вильоту.
- **Механізм відчеплення:** Один кінець праці жорстко прив'язаний до важеля, а інший закінчується кільцем, яке надіте на залізний гак на вершині важеля. Кут нахилу цього гака є найважливішим балістичним налаштуванням. Коли важіль досягає оптимального кута (близько 45 градусів до горизонту), відцентрова сила стягує кільце з гака, праця розкривається, і снаряд летить у ціль. Змінюючи кут гака, інженери-артилеристи точно налаштовували кут вильоту, а отже, і дальність пострілу.

Розділ 3. Застосування військової механіки в оборонній архітектурі та фортифікації

Поява потужної металеві артилерії (особливо гравітаційних требюше, здатних розбивати кам'яну кладку масивними снарядами) докорінно змінила принципи проєктування захисних споруд. Фортифікація перетворилася на науку, що балансувала між матеріалознавством, геометрією та балістикою.

3.1. Еволюція стін: від висоти до масивності

- **До артилерії:** Міські мури зводилися максимально високими та відносно тонкими, щоб унеможливити використання штурмових драбин.
- **Реакція на артилерію:** Під ударами кам'яних ядер високі тонкі стіни миттєво обвалювалися. Інженери-фортифікатори почали знижувати висоту мурів, але радикально збільшувати їхню товщину. Застосовувалася технологія панцирної кладки, де простір між двома кам'яними стінами забутовувався землею та щебенем. Земляне ядро працювало як ідеальний демпфер (амортизатор), поглинаючи кінетичну енергію ударів кам'яних ядер і не даючи стіні розтріскатися.

3.2. Геометрія рикошету (Гласіс та Талюси)

Змінилася і геометрія стін. Вертикальні мури приймали удар ядра під кутом 90 градусів, поглинаючи 100% руйнівної енергії.

- Щоб змінити вектор удару, нижню частину стін і веж (цоколь) почали робити похилою (так званий *талюс*). Ядро, що влучало у похилу поверхню, рикошетило вгору, передаючи муру лише частину своєї кінетичної енергії.
- Зовні фортечного рову почали насипати *гласіс* — пологий земляний насип, який маскував і захищав кам'яний цоколь муру від прямого (настильного) наведення баліст та перших гармат, змушуючи ворога вести вогонь лише по верхніх ярусах.

3.3. Принцип активної оборони: артилерія на вежах Фортеця перестала бути пасивним щитом. Оборонна архітектура почала проектуватися як база для власної механічної артилерії.

- Верхні майданчики веж (донжонів) робили плоскими і надзвичайно міцними (з використанням потужних склепін), щоб вони могли витримати вагу та динамічні вібрації баліст і легких катапульт захисників.
- Вежі виносилися за лінію мурів (фланкувальні вежі). Їхня геометрія розраховувалася так, щоб балісти, встановлені на них, могли вести перехресний вогонь уздовж стін (фланковий вогонь), ліквідуючи "мертві зони" і не дозволяючи ворожим інженерам підвести тарани чи облогові вежі впритул до муру.

Висновки

Військова справа стала одним із найпотужніших рушіїв розвитку прикладної механіки. Проектування металевих машин (від торсіонних баліст до гравітаційних требюше) вимагало глибокого емпіричного розуміння процесів накопичення енергії, кінематики важелів, балістики та міцності конструкцій.

Для сучасного інженера ці середньовічні облогові системи є першими в історії складними динамічними машинами. Їхня еволюція наочно ілюструє фундаментальний інженерний принцип: розвиток засобів ураження (кінетичних систем) неминуче стимулює інновації в матеріалознавстві та проектуванні захисних конструкцій (статичних систем). Закони опору матеріалів, геометрія рикошету та демпфування ударних навантажень, які вперше були застосовані в оборонній архітектурі міст-фортець, сьогодні є базовими принципами конструювання ударостійких механізмів, бронетехніки та промислової безпеки.

МОДУЛЬ 2. МЕХАНІКА РАННЬОМОДЕРНОЇ ДОБИ: ВІД ВІТРЯКІВ ДО ТОЧНИХ МЕХАНІЗМІВ (XVI – XVIII СТ.)

ЛЕКЦІЯ 5. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА У МЛИНАРСТВІ: КІНЕМАТИЧНІ СХЕМИ ВОДЯНИХ ТА ВІТРЯНИХ МЛИНІВ В УКРАЇНІ

Анотація: Лекція присвячена інженерному та кінематичному аналізу млинарства як найпотужнішого макромеханічного двигуна доіндустріальної епохи. Здійснюється детальний розбір принципів передачі крутного моменту за допомогою дерев'яних зубчастих (цівкових) коліс. Наводяться фізико-математичні розрахунки потужності традиційних механізмів: вітряків (стовпових та шатрових) і водяних млинів (верхньобійних та нижньобійних). Оцінюється вплив цих автономних енергетичних комплексів на економічний та інфраструктурний розвиток українських громад.

Вступ. Млинарство як найпотужніший двигун доіндустріальної епохи

До появи парової машини у XVIII столітті людство мало у своєму розпорядженні лише два потужні джерела енергії, що не залежали від м'язової втоми: кінетичну енергію вітру та енергію (потенційну й кінетичну) падаючої води. Млини стали першими масовими стаціонарними машинами, здатними генерувати механічну потужність у промислових масштабах.

Для вітчизняної інженерної історії млинарство відіграло роль фундаментального полігону. Саме на вітряках та водяних млинах відпрацьовувалися складні кінематичні схеми: мультиплікація (підвищення обертів), зміна площини обертання (з горизонтальної на вертикальну і навпаки), використання гальмівних систем, а також розв'язувалися проблеми трибології (тертя) та міцності матеріалів. З інженерної точки зору, млин — це не просто споруда для переробки зерна, а комплексний перетворювач енергії середовища на корисний крутний момент жорна або привід мануфактурного обладнання. Вивчення цих механізмів дає

сучасному фахівцеві з прикладної механіки ключ до розуміння еволюції зубчастих передач, підшипникових вузлів та динаміки роторних машин.

Розділ 1. Кінематичні схеми передачі крутного моменту: дерев'яні зубчасті колеса

Серцем будь-якого млина є його **трансмсія** — система кінематичних ланцюгів, що передає обертання від головного вала (ротора вітряка або водяного колеса) до робочого органу (жорна). Головною інженерною проблемою ранньомодерної доби була відсутність точного металевого лиття, тому всі складні механізми виготовлялися з дерева.

1.1. Цівкова передача (Lantern Gear)

Основою дерев'яної трансмісії була так звана **цівкова передача**, яка складалася з двох елементів:

1. **Палечне колесо (ведуче):** Великий дерев'яний диск, у площину якого (або по ободу) перпендикулярно вбиті міцні дерев'яні кілки — "пальці" або "кулачки".
 2. **Цівкове колесо або шестірня (ведене):** Своєрідний барабан, утворений двома меншими дисками, з'єднаними паралельними круглими стрижнями — "цівками".
- **Кінематика:** Пальці ведучого колеса входять у проміжки між цівками веденого колеса. Найчастіше передача здійснювалася під кутом 90 градусів, перетворюючи обертання горизонтального вала на обертання вертикального веретена, яке крутило жорно.
 - **Опір матеріалів:** Деталі передачі працювали в умовах постійних ударних навантажень та тертя. Тому інженери-млинарі використовували суворо визначені породи деревини. Вали та колеса робили з міцного дуба. А от змінні деталі, що зношувалися найбільше (пальці та цівки), виточували з надзвичайно твердої, але в'язкої деревини — граба, яблуні або білої акації. Дерево природним чином виділяло смоли та соки, які за умов тертя частково виконували функцію сухого мастила, запобігаючи швидкому стиранню.

1.2. Розрахунок передаточного відношення (Мультиплікація)

Головний вал млина (водяне колесо або крила вітряка) обертається повільно (в середньому 10-20 обертів на хвилину). Однак для якісного помолу зерна жорно повинно обертатися зі швидкістю 80-120 обертів на хвилину. Тому млинова трансмісія є **мультиплікатором** (підвищувальною передачею).

Передаточне відношення i кінематичної пари розраховується як відношення кутових швидкостей ведучого ω_1 та веденого ω_2 валів, що обернено пропорційне кількості зубців (пальців) z_1 та z_2 :

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

Якщо велике палечне колесо мало $z_1 = 60$ пальців, а цівкова шестірня $z_2 = 10$ цівок, то передаточне відношення становило $i = 10/60 = 1/6$. Це означає, що за один оберт головного вала жорно робило 6 обертів. Крутний момент при цьому, згідно із законом збереження енергії (без урахування ККД), пропорційно зменшувався, але залишався достатнім для подолання опору зерна між каменями.

Розділ 2. Водяні млини: гідродинаміка верхньобійних та нижньобійних механізмів

Гідравлічні двигуни (водяні млини) були основою промисловості там, де був стабільний гідроресурс. Залежно від топографії річки, інженери застосовували різні кінематичні та енергетичні схеми взаємодії води з лопатями колеса.

2.1. Нижньобійні водяні колеса (Перетворення кінетичної енергії)

Використовувалися на рівнинних, повноводних річках з повільною течією.

- **Конструкція:** Колесо занурювалося нижньою частиною у природний потік води. Лопаті були прямими.
- **Механіка:** Колесо приводилося в рух виключно кінетичною енергією (динамічним напором) потоку води. Теоретична потужність P , яку генерує такий потік, описується рівнянням аеро/гідродинаміки:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \eta$$

де ρ — густина води, A — площа зануреної лопаті, v — швидкість течії, η — коефіцієнт корисної дії (ККД).

- **Інженерна оцінка:** Нижньобійні колеса мали дуже низький ККД (близько 20-30%), оскільки більша частина маси води просто обтікала лопаті, не виконуючи корисної роботи. Однак вони не вимагали складного будівництва дамб і були дешевими у зведенні.

2.2. Верхньобійні водяні колеса (Перетворення потенційної енергії)

Для їх створення річку перегороджували греблею, утворюючи штучний ставок. Це акумулювало не лише об'єм води, але й висоту перепаду (напір).

- **Конструкція:** Вода подавалася по спеціальному лотку на саму вершину колеса. Замість плоских лопатей колесо мало так звані "ковші" або "ящики".
- **Механіка:** Привід здійснювався за рахунок **потенційної енергії** (гравітаційної ваги) води, що заповнювала ковші на одному боці колеса, створюючи асиметричний обертальний момент сили. Потужність такого механізму прямо залежить від гідростатичного напору:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta$$

де ρ — густина води, g — прискорення вільного падіння, Q — об'ємна витрата води ($\text{м}^3/\text{с}$), H — корисний напір (різниця висот), η — ККД.

- **Інженерна оцінка:** Верхньобійні млини були тріумфом гідротехніки доіндустріальної епохи. Їхній ККД сягав 60-80%. Зміна кількості води, що подавалася на лотік за допомогою засувки, дозволяла плавно регулювати потужність і швидкість обертання, що є первинною формою механічного керування процесом.

Розділ 3. Вітряки: аеродинаміка та механіка стовпових і шатрових типів

У степових та лісостепових регіонах України, де гідроресурси були обмежені або річки пересихали влітку, головним джерелом енергії став вітер. Вітряний млин — це складна аеродинамічна машина, ротор якої повинен адаптуватися до мінливого напрямку та сили вітру. Аеродинамічна потужність вітрового потоку розраховується за формулою:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

де ρ_{air} — густина повітря, A — площа, яку описують крила вітряка (ометаєма площа), v — швидкість вітру, C_p — коефіцієнт використання енергії вітру (теоретична межа Беца становить 0.59, але у традиційних дерев'яних вітряках C_p не перевищував 0.15 - 0.20).

3.1. Стовпові вітряки (Post Mills)

Найдавніший та конструктивно найпростіший тип вітрового двигуна.

- **Конструктивна схема:** Уся масивна дерев'яна будівля млина (разом із механізмами, крилами та мішками із зерном) спиралася на один потужний центральний дубовий стовп (вісь), вкопаний глибоко в землю і закріплений хрестовиною.
- **Кінематика наведення на вітер:** Оскільки вітер постійно змінює напрямок, крила вітряка повинні завжди бути спрямовані перпендикулярно до потоку. Щоб "зловити вітер", мірошник мусив повертати весь корпус млина навколо центрального стовпа за допомогою довгої зовнішньої жердини — "води́ла".
- **Інженерні недоліки:** Необхідність обертати величезну масу всієї споруди обмежувала розміри стовпових вітряків. Площа крил A залишалася відносно невеликою, що на пряму обмежувало максимальну генеровану потужність P .

3.2. Шатрові вітряки (Smock Mills / Tower Mills)

Еволюційний стрибок в інженерії вітряків, який з'явився в епоху раннього модерну.

- **Конструктивна схема:** Основа млина (дерев'яний зруб або кам'яна вежа) була нерухомою. Жорстка стаціонарна конструкція дозволяла збільшити висоту споруди у 2-3 рази.
- **Кінематика наведення:** Оберталася лише верхня частина — "шатро" або "шапка" з головним валом і крилами. Шапка спиралася на масивне дерев'яне кільце з роликками, виконуючи функцію гігантського **опорно-поворотного підшипника**.
- **Енергетична ефективність:** Завдяки тому, що на вітер поверталася лише легка шапка, інженери змогли значно збільшити розмір крил (збільшити параметр A в рівнянні аеродинаміки) та підняти їх вище над землею, де швидкість вітру v є стабільнішою і вищою. Це дозволило шатровим вітрякам приводити в дію не одне, а два чи три жорна

одночасно. Крім того, шатрові вітряки вперше почали обладнувати автоматичними гальмівними колодками на головному валі для запобігання пожежам через тертя під час штормових вітрів.

Розділ 4. Вплив млинарства на економічний та інфраструктурний розвиток громад

Впровадження потужних водяних та вітряних механізмів мало безпосередній вплив на економічний та соціальний розвиток українських громад в епоху раннього модерну. Млинарство перетворилося на перший прототип важкої промисловості та індустріальної інфраструктури.

1. **Формування капіталу та спеціалізації:** Млини вимагали колосальних початкових інвестицій (на закупівлю металевих деталей, спеціального каменю для жорен із Франції чи Карпат, оплату праці інженерів-будівельників). Мірошники та власники млинів формували перший прошарок технічної буржуазії та заможних підприємців.
2. **Інфраструктурний каталізатор:** Будівництво водяних млинів вимагало зведення масштабних гідротехнічних споруд — дамб, ставків, лотоків. Дамби одночасно слугували надійними мостовими переправами через річки, що кардинально покращувало логістику цілих регіонів і стимулювало розвиток торгівлі.
3. **Мануфактурна диверсифікація:** Кінематична схема млина (перетворення енергії води/вітру на крутний момент) була універсальною. Згодом замість жорен до вертикального вала почали підключати інші механізми: кулачкові вали для підйому важких молотів (у сукновальнях (фолюшах), папірнях або залізобетонних руднях), лобзикові пилки для лісопилок (тартаків). Водяне колесо стало серцем мануфактурного виробництва доіндустріальної Гетьманщини.

Висновки

Прикладна механіка у млинарстві XVI-XVIII століть є найвищим тріумфом доіндустріальної інженерної думки на українських землях. Розробка та вдосконалення цівкових передач, перехід від простих нижньобійних до високоефективних верхньобійних водяних коліс, а також еволюція вітряків від стовпових до шатрових конструкцій доводять здатність ранньомодерних інженерів розуміти і застосовувати закони статички, кінематики та гідро- і аеродинаміки.

Для сучасного фахівця з прикладної механіки історія млинарства — це еталонний приклад того, як еволюція механізмів перетворення енергії безпосередньо формує економічний потенціал та інфраструктурний ландшафт держави. Системи мультиплікації, опорні підшипники та принципи регулювання потужності, що зародилися у дерев'яних млинах, сьогодні є концептуальною основою проектування сучасних вітрогенераторів, гідротурбін та складних індустріальних трансмісій.

ЛЕКЦІЯ 6. МЕХАНІЗМИ КОЗАЦЬКИХ ЗБРОЯРЕНЬ І ГУТ: ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВОДИ ДЛЯ ПРИВОДУ КОВАЛЬСЬКИХ МІХІВ ТА ВАЖКИХ МОЛОТІВ

Анотація: Лекція розкриває інженерні принципи переходу від ручного ремісничого виробництва до ранньомодерної мануфактури на українських землях у добу Гетьманщини. У фокусі уваги — кінематика та динаміка кулачкових механізмів, які забезпечили революційне перетворення обертового руху гідравлічних двигунів (водяних коліс) на зворотно-поступальний рух. Детально аналізується механізація козацьких рудень, гут та зброярень: робота важких хвостових молотів, автоматизація дуття за допомогою міхів та розвиток артилерійського лиття. Матеріал формує розуміння історичних витоків сучасних систем автоматизації металообробки та машинобудування.

Вступ. Водяне колесо як серце ранньої металургії

Розвиток артилерії, холодної та вогнепальної зброї в умовах постійних військових конфліктів XVII-XVIII століть вимагав від Козацької держави колосальних обсягів металу. Видобуток болотної руди та її переплавлення у сиродутних горнах за допомогою ручних міхів, а також ручне кування криці (залізної губки зі шлаками) м'язовою силою ковалів більше не могли забезпечити потреби війська та економіки.

Виникла гостра необхідність в індустріалізації процесу — створенні мануфактур (рудень, гамарень, гут та зброярень). Основою цього мануфактурного виробництва Гетьманщини стала **передача енергії води**. Інженери тієї доби здійснили перехід від використання водяного колеса виключно для обертання млинових жорен до приводу потужних ударних та пневматичних механізмів.

Для сучасного фахівця з прикладної механіки козацька рудня є першим історичним прикладом комплексного машинобудівного цеху, де один потужний первинний двигун (ротор) через систему трансмісій та кінематичних перетворювачів приводив у дію групу різнотипних верстатів (молотів, міхів, точил).

Розділ 1. Передача енергії у мануфактурному виробництві Гетьманщини

Організація енергетичної інфраструктури козацької рудні вимагала масштабних гідротехнічних та механічних рішень.

1.1. Гідротехнічний вузол та акумуляція енергії

Рудні будувалися виключно на річках, де зводилися потужні земляні та дерев'яні греблі. Гребля акумулювала воду у ставку, створюючи необхідний гідростатичний напір (потенційну енергію). Вода подавалася через систему шлюзів (засувок) по дерев'яних лотоках на кілька водяних коліс одночасно. Кожне колесо обслуговувало свій кінематичний ланцюг: одне приводило в рух ковальські міхи, інше — важкі молоти, третє — свердлильні чи точильні верстати для обробки стволів мушкетів і гармат.

1.2. Головний розподільчий вал (Трансмісія)

Енергія від водяного колеса (найчастіше верхньобійного типу для максимального крутного моменту) передавалася на **головний горизонтальний вал**. Це була масивна дубова колода (діаметром до 60-80 см і довжиною до 10 метрів).

- **Опір матеріалів:** Вал зазнавав гігантських напружень на кручення та згин. Щоб уникнути руйнування, кінці вала охоплювали залізними бандажами і вбивали в них міцні сталеві цапфи (півосі).
- **Трибологія вузлів:** Цапфи оберталися у відкритих підшипниках ковзання — масивних кам'яних або чавунних гніздах, які постійно змащували дьогтем або тваринним жиром для зменшення зносу та відведення тепла від тертя.

Розділ 2. Принцип дії кулачкових механізмів: перетворення обертового руху на зворотно-поступальний

Найбільшим технологічним проривом ранньомодерної металообробки став винахід та масове застосування **кулачкового (кривошипного) механізму**. Якщо у млині обертальний рух просто передавався через зубчасті колеса (залишаючись обертальним), то кування і нагнітання повітря вимагали циклічного лінійного (зворотно-поступального) руху.

2.1. Кінематика важкого хвостового молота

Важкий водяний молот (вагою від 100 до 500 кг) використовувався для віджимання шлаків із розпеченої криці та її ущільнення.

- **Будова механізму:** На головному обертовому валу жорстко кріпилися масивні дерев'яні або залізні виступи — **кулачки (cams)**. Поруч, на масивній станині, шарнірно кріпилося довге руків'я молота. Руків'я являло собою важіль першого роду.
- **Фаза акумуляції енергії (Підйом):** Коли вал обертається, кулачок наїжджає на задній кінець руків'я молота (хвіст) і тисне на нього вниз. Протилежний кінець із важким залізним бойком підіймається вгору, накопичуючи потенційну енергію ($E_p = m \cdot g \cdot h$).
- **Фаза удару (Скидання):** Щойно кулачок через обертання вала втрачає контакт із хвостом руків'я, молот миттєво зривається вниз під дією гравітації (вільне падіння). Відбувається різкий удар бойка по розпеченому металу на ковадлі. Потенційна енергія переходить у кінетичну, а потім — у роботу пластичної деформації металу.
- **Частота ударів:** Вал міг мати 3, 4 або 6 кулачків. За один оберт вала молот робив відповідну кількість ударів (від 30 до 120 ударів на хвилину залежно від швидкості течії води). Ця кінематична схема (Cam-and-Follower) сьогодні лежить в основі роботи газорозподільних механізмів двигунів внутрішнього згорання.

2.2. Механізація дуття (Ковальські міхи)

Досягнення температур понад 1200°C для плавлення металу вимагало безперервної подачі величезних об'ємів кисню в піч (домну).

- **Кінематика міхів:** Два велетенські шкіряні міхи (у формі гармошки) розташовувалися біля печі. Над ними проходив кулачковий вал. Кулачки по черзі натискали на важелі, стискаючи міхи та виштовхуючи повітря через сопло (фурму) у піч. Коли кулачок відходив, важка протизвага (балансир) розтягувала міх назад, засмоктуючи нову порцію повітря через клапан. Поперемінна робота двох міхів забезпечувала потужний і, головне, неперервний повітряний потік.

Розділ 3. Механізація металообробки в козацьких руднях, майстернях-зброярнях та розвиток техніки лиття

Автоматизація базових процесів за допомогою води вивільнила людські ресурси та дозволила козацькій державі створити потужний військово-промисловий комплекс, здатний випускати зброю європейського рівня.

3.1. Майстерні-зброярні: від кування до механічної обробки

- **Свердління стволів:** Якщо раніше стволи мушкетів виковували з листа металу, згортаючи його в трубку (що залишало небезпечний шов), то в механізованих зброярнях почали свердлити стволи з суцільних металевих болванок. Енергія водяного колеса передавалася через зубчасту трансмісію на горизонтальні шпинделі, на яких кріпилися довгі свердла. Це кардинально підвищило точність бою вогнепальної зброї, безпеку стрільця та здатність металу витримувати тиск порохових газів.
- **Точильні верстати:** Заточування тисяч одиниць холодної зброї (шабель, списів) здійснювалося на величезних точильних каменях, що безпосередньо оберталися від водяних валів. Обертання з високою кутовою швидкістю, що супроводжувалося подачею води для охолодження сталі (щоб уникнути відпуску гарту), стало першим прообразом сучасних абразивних верстатів.

3.2. Розвиток техніки лиття (Артилерія та Дзвонарство)

Військова могутність Гетьманщини значною мірою трималася на власній артилерії. Виготовлення бронзових та чавунних гармат вимагало найвищого рівня металургійної інженерії.

- **Термодинаміка печей:** Механізовані міхи дозволили створити домни, здатні розплавляти значні масиви металу. Температурний режим контролювався виключно за кольором розпеченого металу, що вимагало колосального досвіду майстра-людвисара.
- **Формовка та лиття:** Гармати відливали у спеціальних земляних або глиняних формах. Найбільшим інженерним викликом було створення порожнини ствола. Для цього використовували глиняний стрижень (сердечник), який центрували всередині форми. Після заливання металу та його кристалізації форму розбивали, а стрижень висвердлювали.
- **Якість металу:** Завдяки роботі важких водяних молотів, чавун та залізо, що виплавлялися на козацьких гутах, позбавлялися шкідливих домішок і шлаків, набуваючи високої міцності та пружності. Це запобігало розриву стволів гармат під час ведення інтенсивного вогню.

Висновки

Застосування енергії води для приводу ковальських міхів та важких молотів у козацьких зброярнях і руднях стало першим кроком до промислової революції на українських землях.

Створення мануфактурного виробництва на базі кулачкових механізмів продемонструвало геніальну здатність ранньомодерних інженерів здійснювати перетворення рухів (від обертального до зворотно-поступального). Завдяки механізації процесів кування, дуття та свердління, Козацька держава змогла забезпечити свою армію передовою вогнепальною зброєю та артилерією.

Для сучасного спеціаліста з прикладної механіки глибокий аналіз роботи цих перших автоматизованих ліній є ключем до розуміння еволюції машинобудування. Закони кінематики, трибології та динаміки, які інтуїтивно використовувалися козацькими майстрами-людвисарами та ковалями, сьогодні є науковим фундаментом для проєктування кувальних пресів, кривошипно-шатунних механізмів та сучасних ливарних комплексів.

ЛЕКЦІЯ 7. ГОДИННИКАРСТВО ТА ТОЧНА МЕХАНІКА: ЕВОЛЮЦІЯ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ТА РЕГУЛЯТОРІВ ХОДУ

Анотація: Лекція присвячена аналізу зародження міської точної механіки та годинникарства як першої високотехнологічної галузі доіндустріальної епохи. Здійснюється інженерне дослідження конструкцій перших баштових годинників на ратушах міст з Магдебурзьким правом. Детально розглядається еволюція зубчастих передач, кінематика спускових механізмів (шпиндельного та анкерного) і фізика маятникових регуляторів ходу. Оцінюється вплив годинникарства на підвищення вимог до точності виготовлення деталей, розвиток метрології та створення перших прецизійних металообробних верстатів.

Вступ. Від вимірювання часу до мікромеханіки

Доба раннього модерну (XVI–XVIII ст.) характеризується не лише створенням гігантських гідравлічних мануфактур, але й зародженням абсолютно нового напрямку інженерії — **точної механіки** (мікромеханіки). Якщо млинарство і металургія оперували кіловатами потужності та тоннами ваги, вибачаючи похибки у сантиметри, то годинникарство вимагало передачі мікрозусиль із точністю до десятих часток міліметра.

Механічний годинник став першим в історії складним автоматом — пристроєм, що міг функціонувати тривалий час без втручання людини, суворо підпорядковуючись законам кінематики та динаміки. З точки зору прикладної механіки, годинник є ідеальною системою, яка перетворює потенційну енергію (піднятої гирі або стиснутої пружини) на строго дозований, періодичний обертальний рух системи стрілок.

Вивчення еволюції годинникових механізмів є критично важливим для сучасного інженера, оскільки саме в цій галузі вперше були розв'язані проблеми профілювання зубців, створення складних кінематичних ланцюгів, мінімізації тертя у підшипниках та розробки теорії коливань. Годинникар став предтечею сучасного інженера-приладиста та спеціаліста з автоматизації.

Розділ 1. Зародження міської точної механіки: баштові годинники міст з Магдебурзьким правом

Поява механічних годинників на українських землях нерозривно пов'язана з поширенням Магдебурзького права у XIV–XVII століттях (Львів, Київ, Кам'янець-Подільський, Дрогобич). Магдебурзьке право принесло нову філософію економічного та суспільного життя, де час набув комерційної цінності.

1.1. Соціально-інженерний контекст Робота ремісничих цехів, укладання торгових угод, початок і закінчення робочого дня, засідання міського магістрату — усе це вимагало єдиного, незалежного від сонця чи церкви, еталона часу. Символом цієї нової урбаністичної реальності став **міський дзигар** (баштовий годинник), встановлений на найвищій вежі ратуші.

1.2. Механіка гравітаційного приводу баштового годинника

Перші баштові годинники були гігантськими (розміром з кімнату) і надзвичайно важкими залізними механізмами, які викувували місцеві ковалі.

- **Джерело енергії:** Первинним двигуном слугувала гравітація. На масивний дерев'яний або металевий вал намотувався канат, до якого кріпилася важка гиря (вагою від десятків до сотень кілограмів).
- **Фізика процесу:** Піднята гиря запасала потенційну енергію ($E_p = m \cdot g \cdot h$). Під дією сили тяжіння гиря намагалася впасти вниз, розкручуючи головний вал. Головною інженерною проблемою було **не дати гирі впасти з прискоренням вільного падіння**. Кінетична енергія мала вивільнятися мікроскопічними, суворо контрольованими порціями. Для цього знадобився революційний винахід — спусковий механізм (ескапмент).

Розділ 2. Еволюція зубчастих передач: від емпірики до точної геометрії

Обертання від головного вала до стрілок (спочатку була лише одна годинна стрілка, згодом з'явилася хвилинна) передавалося через **зубчастий (колісний) механізм** (gear train).

2.1. Кінематика колісної системи (Дільник частоти)

Колісна система годинника є редуктором, але з унікальною функцією — вона працює як мультиплікатор швидкості від барабана до спуску, і як точний дільник частоти для стрілок.

- Передаточні числа (зубчасті співвідношення) розраховувалися з абсолютною математичною точністю. Щоб хвилинка стрілка робила рівно 1 оберт за годину, а годинна — 1 оберт за 12 годин, передаточне відношення між їхніми осями мало становити строго 1:12 (так званий *триб ходу* або *хвилинний триб*).

2.2. Профілювання зубців та опір матеріалів

Ранні годинники мали залізні колеса, викувані вручну. Зубці мали трикутну або прямокутну форму (як цівки у млинах).

- **Проблема тертя:** При такій формі зуба передача крутного моменту відбувалася нерівномірно (зі зміною кутової швидкості та ковзанням зуба по зубу), що викликало величезне тертя, знос і "смикання" механізму.
- **Еволюція профілю:** З підвищенням вимог до точності, годинникарі емпірично (а згодом і математично) дійшли до необхідності використання **епіциклоїдального (а згодом евольвентного) профілю зуба**. Такий профіль забезпечує ідеальне перекочування зубців один по одному без ковзання, підтримуючи постійне передаточне відношення і мінімізуючи втрати енергії.
- **Матеріалознавство:** Від грубого заліза майстри перейшли до використання латуні (для коліс) та загартованої сталі (для трибів — малих шестерень). Пара "сталь-латунь" має низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість, що стало стандартом у приладобудуванні.

Розділ 3. Спускові механізми (Escapements): серце годинника

Спусковий механізм — це ключовий вузол, який перетворює неперервний обертовий рух зубчастої передачі на дискретний (кроковий) рух і задає ритм усьому механізму.

3.1. Шпindelний спуск (Verge Escapement)

Найдавніший механізм, який використовувався у перших ратушних годинниках.

- **Конструкція:** Складається з *коронного колеса* (зубчастого колеса, зубці якого загнуті під кутом 90 градусів до площини обертання, нагадуючи корону) та вертикального вала — *шпинделя* (verge), на якому закріплені дві лопатки (палети), рознесені на кут близько 90-100 градусів.
- **Кінематичний цикл:** Коронне колесо, кероване гирею, намагається обертатися. Зубець колеса впирається у верхню палету, штовхаючи її і повертаючи шпindel. Щойно верхня палета пропускає зубець (відбувається "спуск"), колесо обертається далі, але миттєво вдарається нижнім зубцем у нижню палету, змушуючи шпindel різко зупинитися і почати обертання у зворотному напрямку.
- **Регулятор:** До шпинделя кріпився *фоліо* (foliot) — горизонтальне коромисло з тягарцями на кінцях. Віддаляючи або наближаючи тягарці до центру, майстер змінював момент інерції ($I = m \cdot R^2$), регулюючи швидкість коливань.
- **Інженерні недоліки:** Шпindelний спуск мав "відкіт" (recoil) — коронне колесо змушене було трохи обертатися назад при кожному коливанні. Це призводило до величезних втрат енергії та зносу. Точність була низькою — похибка сягала 15–30 хвилин на добу.

3.2. Анкерний спуск (Anchor Escapement)

Винайдений у XVII столітті, анкерний спуск здійснив революцію у точній механіці.

- **Конструкція:** Складається з плоского ходового (анкерного) колеса із загостреними зубцями та анкерної вилки (яка нагадує корабельний якір), що має дві палети.
- **Переваги кінематики:** Всі рухи відбуваються в одній площині. Анкерна вилка здійснює коливання з дуже малим кутом (3–5 градусів). Коли зубець колеса б'є по нахиленій площині палети (імпульсна площина), він не лише зупиняється, але й "відштовхує" вилку, передаючи мікроімпульс енергії регулятору ходу. Відсутність сильного відкоту та малий кут коливань кардинально знизили тертя і підвищили точність.

Розділ 4. Маятникові регулятори ходу: фізика ізохронності

Поки регулятором слугувало коромисло (фоліо), точність годинника залежала від сили тертя та маси гирі. Геніальне рішення проблеми стабілізації частоти запропонував Галілео Галілей, а практично реалізував Християн Гюйгенс у 1656 році, застосувавши **маятник**.

- **Закон ізохронності маятника:** Фізична сутність маятника полягає у тому, що період його коливань T за умови малих кутів відхилення залежить **лише від довжини підвісу** L та прискорення вільного падіння g , і математично виражається формулою:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

- **Інженерне значення:** Маса маятника та амплітуда його розмаху не впливають на час одного коливання. Це був ідеальний стабілізатор частоти.
- **Синергія механізмів:** Маятник був поєднаний з анкерним спуском. Анкерна вилка була жорстко зв'язана зі стрижнем маятника. З одного боку, маятник своїм строгим ритмом диктував анкеру, коли пропускати зубці колеса. З іншого боку, анкер при кожному ударі зубця передавав маятнику мікроімпульс енергії, компенсуючи втрати на тертя повітря та в підвісі (незагасаючі гармонічні коливання).
- Цей симбіоз зменшив добову похибку з 15 хвилин до 10-15 секунд, перетворивши годинник на справжній прецизійний вимірювальний прилад.

Розділ 5. Підвищення вимог до точності виготовлення деталей та розвиток верстатобудування

Створення маятникових годинників з анкерним спуском кардинально змінило вимоги до ремісників. Ручне випилювання зубців напилком більше не задовольняло інженерних потреб: найменша асиметрія кроку зубців чи нерівність осі призводила до зупинки складного механізму.

Перехід від ручної праці до прецизійних верстатів:

1. **Зубофрезерні пристрої (Gear-cutting engines):** Щоб нарізати ідеально рівні зубці на латунних колесах, годинникарі винайшли перші ділильні диски та спеціальні ручні фрезерні верстати. Заготовка колеса фіксувалася, а обертова фреза (cutter) вирізала паз правильного профілю. Ділильний диск гарантував абсолютну математичну рівність кутів між зубцями.
2. **Годинникові токарні верстати (Watchmaker's lathes):** Виточування тонких сталевих осей (цапф), діаметр яких вимірювався міліметрами, вимагало надвисокої жорсткості верстата. Годинникарі створили мініатюрні токарні верстати з точними бронзовими підшипниками ковзання, які забезпечували безбиттєве обертання шпинделя ($\text{runout} < 0.01 \text{ mm}$).
3. **Зародження метрології:** З'явилася потреба у вимірюванні мікроскопічних величин. Були створені перші мікрометричні гвинти, штангенциркулі та калібри. Вперше в інженерії виникло поняття "допусків і посадок" — усвідомлення того, що деталь не буває абсолютно точною, але її відхилення має знаходитися у суворо заданих межах.

Висновки

Зародження міської точної механіки та годинникарства стало переломним етапом в історії інженерії. Баштові годинники ратуш міст із Магдебурзьким правом започаткували еру механізації часу, перетворивши абстрактне поняття на чітко вимірювану фізичну величину. Еволюція від грубого шпindelного спуску до анкерного механізму та впровадження маятникового регулятора Гюйгенса продемонстрували триумф теоретичної фізики та кінематики у розв'язанні практичних завдань. Для сучасного фахівця з прикладної механіки історія годинникарства є найважливішим прикладом того, як жорсткі вимоги до точності λειτουργу (функціонування) кінцевого пристрою неминуче стимулюють розвиток матеріалознавства, метрології та створення принципово нових металообробних верстатів (зубофрезерних, прецизійних токарних). Саме годинникарство заклало технологічний та інтелектуальний фундамент для сучасної робототехніки, автоматики та точного машинобудування.

ЛЕКЦІЯ 8. ТРАНСПОРТНА МЕХАНІКА: КОНСТРУКЦІЯ КОЗАЦЬКОГО ВОЗА (МАЗІ), РОЗПОДІЛ МАС ТА РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація: Лекція розкриває інженерні засади транспортної механіки козацької доби на прикладі класичного вантажного засобу — чумацької мажі. Здійснюється аналіз механічних властивостей різних порід деревини та металу, що застосовувалися у конструкції. Детально розглядається міцність осей, маточин і коліс, а також статичний та динамічний розподіл навантажень на гужовий транспорт, що перевозив близько 1 тонни вантажу без ресорної підвіски. Оцінюється вплив надійності засобів пересування та ефективної логістики на розбудову торговельних шляхів та вільних міст.

Вступ. Мажа як шедевр транспортної інженерії бездоріжжя

Розвиток економіки та мілітарної потужності Козацької держави був би неможливим без ефективної транспортної логістики. Переміщення колосальних обсягів військового спорядження, провіанту, а також ведення масштабної транзитної торгівлі сіллю та рибою вимагало створення надійного вантажного транспорту.

Цим транспортним засобом стала **чумацька мажа** (або козацький віз). З точки зору сучасної транспортної механіки, мажа — це геніальний приклад композитної конструкції, ідеально адаптованої до екстремальних умов експлуатації. Вона мала долати тисячі кілометрів степовим бездоріжжям, перевозячи до 60–80 пудів вантажу (близько 1 тонни). Головним інженерним викликом була повна відсутність амортизації (металевих ресор), що вимагало компенсації динамічних ударів виключно за рахунок пружності самої конструкції та правильного підбору матеріалів.

Вивчення механіки козацького воза формує у фахівця з прикладної механіки розуміння основ конструювання несучих рам, розрахунку осей на згин та оптимізації трибологічних процесів (тертя) у підшипниках ковзання.

Розділ 1. Розвиток транспортної інженерії козацької доби

Вимоги до козацького воза формувалися під впливом двох ключових факторів: військової тактики та далекобійної комерційної логістики.

1.1. Військова логістика (Рухомий табір)

У військовій справі козацькі вози використовувалися не лише для перевезення припасів, але й як елементи польової фортифікації — знаменитого **козацького табору**. Під час бою вози шикувалися у замкнене коло або кілька рядів, скріплювалися між собою ланцюгами та голоблями. Це висувало суворі вимоги до стандартизації габаритів (висоти бортів, довжини осей), міцності бокових стінок, які мали витримувати влучання куль та стріл, а також до мобільності — здатності швидко розвернути важкий віз на 90 градусів.

1.2. Комерційна (чумацька) логістика Чумацький промисел вимагав максимальної вантажопідйомності при мінімальній власній масі транспортного засобу. Кожна зайва деталь означала втрату корисного навантаження. Інженери-стельмахи епохи раннього модерну створили конструкцію, яка була максимально простою, стандартизованою та ремонтпридатною в польових умовах без застосування складного ковальського інструменту. Мажа збиралася переважно без залізних цвяхів — деталі кріпилися за допомогою дерев'яних замків, шипів та міцних шкіряних гужвів (ременів).

Розділ 2. Механічні властивості деревини та металу в елементах чумацької мажі

Головним секретом надійності мажі було використання принципів біоміметики та композитних матеріалів: комбінування різних порід деревини залежно від типу напружень (стиск, згин, зріз), які виникали в конкретному вузлі.

2.1. Чому уникали жорстких металевих кріплень? Метал (залізо) у ранньомодерну добу був дорогим, але головна причина його обмеженого використання крилася в іншому. Металеві болти та скоби створюють абсолютно жорсткі вузли. При русі бездоріжжям (з навантаженням в 1 тонну) жорсткі металеві кріплення швидко розбивали б деревину навколо себе під дією ударних вібрацій, що призводило б до руйнування конструкції через небезпечне явище **втоми матеріалу**. Натомість дерев'яні шипи та шкіряні гужви працювали як природні сайлентблоки (амортизатори). Вони дозволяли рамі воза мати певну просторову гнучкість, згинатися, "дихати", поглинаючи кінетичну енергію ударів без руйнування.

2.2. Розподіл порід деревини за механічними властивостями

- **Дуб (Висока міцність на стиск та зріз):** З дуба виготовляли найвідповідальніші та найбільш навантажені деталі — осі та маточини коліс (центральні втулки). Дуб витримує колосальні статичні навантаження, довговічний і стійкий до гниття.
- **Ясен та В'яз (Висока міцність на згин та пружність):** З цих порід вигинали обідтя коліс та виготовляли спиці. Спиця колеса під час руху працює не лише на стиск, але й на поздовжній згин (buckling) від бокових ударів об колію. Ясен забезпечував необхідну пружність, щоб колесо не розсипалося при потраплянні в яму.
- **Липа або Сосна (Легкість):** Використовувалися для виготовлення кузова (бортів та днища), де навантаження розподілене по площині, а головним критерієм є зменшення власної (мертвої) маси воза.

2.3. Роль металу (Шинування)

Метал застосовувався точково. Головним металевим елементом була залізна шина, яку натягували на дерев'яний обід колеса у розпеченому стані. Охолоджуючись, шина стягувалася, мертво фіксуючи всі дерев'яні деталі колеса (спиці в маточині та ободі) і захищаючи обід від абразивного стирання об каміння.

Розділ 3. Аналіз міцності осей, маточин та коліс, правильний розподіл навантажень

Безпека вантажу та самого чумака напряду залежала від правильного розподілу мас та розрахунку навантажень. З точки зору статички твердого тіла, мажа є системою балок на двох опорах (двох осях).

3.1. Розрахунок осі на згин

Дерев'яна вісь мажі працює як балка на двох шарнірних опорах (точках контакту з колесами), на яку діє рівномірно розподілене навантаження (маса кузова з вантажем).

- **Максимальний згинальний момент (M_{max})** виникає в центрі осі. Саме тому козацькі осі завжди робилися масивнішими (товстішими) посередині і звужувалися до країв (до цапф, на які насаджувалися колеса).
- **Епюра напружень:** Майстри-стельмахи інтуїтивно повторювали епюру згинальних моментів: там, де напруження найбільше, переріз дубового бруса був максимальним.

3.2. Кінематика коліс: розвал (Camber) та конусоподібність (Dishing)

Козацькі колеса не були плоскими. Спиці монтувалися у маточину під невеликим кутом назовні, створюючи форму пологого конуса (конусоподібність). Крім того, сама вісь мала невеликий нахил кінців вниз (розвал).

- **Механічна доцільність:** Коли завантажений віз їхав похилою дорогою або влучав у глибоку колію, виникав величезний боковий (поперечний) тиск (lateral thrust force), що намагався виломати спиці. Завдяки конусоподібній формі та розвалу, нижні спиці (які в цей момент несли все навантаження) ставали строго вертикально, приймаючи удар уздовж своїх волокон на стиск, що є найміцнішим станом деревини.
- Така геометрія також утримувала колесо на осі, притискаючи маточину до внутрішнього, товстого краю осі, що запобігало злітання колеса під час руху.

3.3. Трибологія пари "маточина-вісь"

Тертя було головним ворогом гужового транспорту. Вісь мажі та маточина виготовлялися з дерева.

- **Мастило:** Для зменшення коефіцієнта тертя ковзання (μ) та відведення теплової енергії вузол постійно змащували **дьогтем** (густою смолистою рідиною з березової кори або сосни). Дьоготь утворював плівку (граничне тертя), яка не видавлювалася під вагою в 1 тонну і захищала деревину від перегріву та загоряння (що було реальною загрозою при тривалих спусках). Додатково на вісь іноді набивали металеву пластину (підметок), щоб уникнути протирання осі знизу.

Розділ 4. Вплив ефективної транспортної логістики на розбудову торговельних шляхів

Створення надійної, ремонтпридатної та вантажопідйомної мажі мало колосальні макроекономічні наслідки для українських земель. Механічна надійність транспорту стала фундаментом для розбудови розгалуженої логістичної мережі.

1. **Розбудова торговельних трансконтинентальних магістралей:** Завдяки мажам сформувалися великі транспортні артерії (Муравський, Чорний, Чумацький шляхи), що

з'єднали чорноморські соляні промисли та порти з Лівобережною та Правобережною Україною, а також з ринками Центральної Європи.

2. **Створення логістичної інфраструктури:** Можливість транспортувати тисячі тонн вантажів стимулювала розбудову супутньої інфраструктури. На торгових шляхах виникла мережа заїжджих дворів (корчем), поромних переправ через великі річки (Дніпро, Південний Буг), укріплених мостів та митниць.
3. **Урбанізація та розвиток вільних міст:** Транспортна логістика безпосередньо вплинула на розбудову міст із Магдебурзьким правом. Міста, що стояли на перехресті чумацьких шляхів (наприклад, Ніжин, Лубни, Біла Церква), перетворювалися на потужні економічні центри. Вільні підприємці, ремісники (стельмахи, ковалі) та купецтво формували новий фінансовий капітал, що забезпечував незалежність міських магістратів та стимулював подальший розвиток прикладної механіки та міської інфраструктури.

Висновки

Конструкція чумацької мажі є взірцем оптимального інженерного розв'язання складної транспортної задачі в умовах доіндустріальної епохи. Відмова від жорстких металевих з'єднань на користь пружних дерев'яно-шкіряних кріплень, геніальне використання різних порід деревини для осей та спиць, а також застосування кінематичної конусоподібності коліс дозволили створити транспортний засіб, здатний долати тисячі кілометрів степового бездоріжжя.

Для сучасного фахівця спеціальності "Прикладна механіка" вивчення транспортної логістики козацької доби демонструє, як закони статички, опору матеріалів та трибології працюють у реальних екстремальних умовах. Розуміння того, як правильний розподіл мас та композитна структура забезпечували довговічність мажі, лежить в основі сучасного проектування великовантажних автомобілів, сільськогосподарських причепів та рамних позашляховиків, де принципи пружності та надійності залишаються незмінними. Своєю чергою, надійність засобів пересування стала тим механічним рушієм, який забезпечив економічну потужність та інфраструктурний розвиток України-Русі.

МОДУЛЬ 3. ПРОМИСЛОВА РЕВОЛЮЦІЯ ТА РОЗКВІТ ДИНАМІКИ МАШИН (XIX – СЕРЕДИНА XX СТ.)

ЛЕКЦІЯ 9. ВПРОВАДЖЕННЯ ПАРОВИХ МАШИН: ТЕРМОДИНАМІКА ТА МЕХАНІКА ПАРОВИХ ПРИВОДІВ НА ЗАВОДАХ І В ШАХТАХ ДОНБАСУ

Анотація: Лекція присвячена аналізу радикальної зміни технологічного укладу в XIX столітті — переходу від ручної праці та використання природних джерел енергії (води, вітру) до машинної ери завдяки винаходу теплових двигунів. Здійснюється теоретичний огляд основ термодинаміки парової машини. Детально досліджується кінематика та динаміка кривошипно-шатунного механізму (КШМ), що дозволив перетворити поступальний рух поршня на обертальний рух трансмісії. Окреслюється масштабний вплив парових приводів на інтенсивний розвиток важкого машинобудування, металургії та вуглевидобувної промисловості (шахтні підйомники, насоси) на Півдні та Сході України (Донбас).

Вступ. Термодинамічна революція в інженерії

До XIX століття промисловий потенціал суспільства був жорстко прив'язаний до географії. Мануфактури, рудні та лісопилки могли функціонувати лише там, де був достатній гідроресурс (на річках) або стабільні вітри. З винайденням і вдосконаленням парової машини (Джеймс Ватт та інші інженери кінця XVIII – початку XIX ст.) відбулася фундаментальна зміна парадигми.

Людство вперше отримало **універсальний автономний первинний двигун**, який можна було встановити будь-де. З точки зору фізики, це був прорив у **термодинаміці** — науці про перетворення теплової енергії на механічну роботу. Хімічна енергія спалювання вугілля перетворювалася на теплову енергію пари під тиском, яка, розширюючись у циліндрі, виконувала корисну механічну роботу ($W = \int P dV$).

Для майбутнього фахівця з прикладної механіки епоха впровадження парових машин є точкою відліку сучасної теорії механізмів і машин (ТММ) та динаміки, оскільки саме тут виникла потреба в точних розрахунках складних кінематичних ланцюгів, маховиків, золотникових розподільників пари та з'явилося поняття циклічних напружень (втоми металу).

Розділ 1. Зміна технологічного укладу та перехід від ручної праці до машинної ери

Впровадження парових машин запустило процес, відомий як **промислова революція** (або індустріалізація). В Україні цей перехід від ручної праці та мануфактури до машинної (фабрично-заводської) ери відбувався надзвичайно інтенсивно у другій половині XIX століття.

1.1. Філософія машинної ери

Технологічний уклад змінився радикально. У доіндустріальну добу інструмент (молоток, пила, різець) тримала рука людини, і саме людина була джерелом енергії та керуючим органом. У машинну еру виникла класична тріада промислового обладнання:

1. **Двигун** (парова машина), який генерує енергію.
2. **Трансмісія** (система валів, шківів та пасів), яка передає і розподіляє крутний момент по всьому цеху.
3. **Машина-знаряддя** (механічний ткацький верстат, токарний верстат, прокатний стан), робочі органи якої безпосередньо впливають на матеріал. Людина ж перетворилася на оператора, який контролює параметри процесу (швидкість, подачу, тиск).

1.2. Термодинамічний цикл парової машини

З інженерної точки зору, парова машина працювала за ідеалізованим термодинамічним циклом Ренкіна (Rankine cycle).

- У **паровому котлі** вода ізобарно (при постійному тиску) нагрівалася та перетворювалася на насичену, а потім — на перегріту пару (робоче тіло).
- Пара подавалася у **циліндр**, де адіабатно розширювалася, штовхаючи поршень і виконуючи механічну роботу.
- Відпрацьована пара випускалася в атмосферу або в конденсатор (де ізобарно охолоджувалася і перетворювалася назад на воду).

Цей процес вимагав від інженерів глибоких знань з теплотехніки та міцності матеріалів (розрахунок товщини стінок котлів для уникнення їх розриву під високим тиском).

Розділ 2. Розвиток важкого машинобудування на Півдні та Сході України

Наявність автономного потужного двигуна дозволила будувати заводи не біля річок, а безпосередньо біля джерел сировини — кам'яного вугілля та залізної руди. Саме цей фактор спричинив бурхливий розвиток важкого машинобудування на Півдні та Сході України.

2.1. Формування індустріальних центрів (Донбас та Придніпров'я)

Після відкриття величезних покладів вугілля у Донецькому басейні та багатій залізній руді у Криворізькому басейні, степи Сходу та Півдня України перетворилися на найпотужніший індустріальний хаб Східної Європи.

- З'являються металургійні гіганти: завод Джона Юза (сучасний Донецьк), Дніпровський завод (Кам'янське), заводи в Катеринославі (Дніпрі), Луганську, Маріуполі.
- Виникає **важке машинобудування** — галузь, що створює "машини для виробництва машин". Українські заводи починають масовий випуск паротягів, залізничних вагонів, шахтного устаткування, парових котлів та сільськогосподарської техніки.

2.2. Технологічна інтеграція: вугілля, сталь і пара

Економіка Донбасу працювала як замкнена термодинамічна система: вугілля було потрібне для виплавки сталі та нагрівання води в парових котлах; сталь йшла на будівництво нових парових машин, рейок та шахтного кріплення; а парові машини, у свою чергу, використовувалися для того, щоб видобувати ще більше вугілля і руди. Цей безперервний цикл стимулював експоненціальний ріст економіки, урбанізацію та зміну соціальної структури суспільства (появу інженерно-технічної інтелігенції та промислового пролетаріату).

Розділ 3. Механіка кривошипно-шатунних механізмів парових приводів

Головним "секретом" універсальності парової машини, що дозволило застосувати її на заводах, став перехід від прямолінійного руху до обертового. Вирішенням цієї задачі стала **механіка кривошипно-шатунного механізму (КШМ)**.

3.1. Кінематичний аналіз КШМ

КШМ — це плоский важільний механізм, призначений для перетворення зворотно-поступального руху (поршня) на обертальний рух (вала), і навпаки.

Основні ланки механізму парового приводу:

1. **Повзун (Поршень зі штоком та крейцкопфом):** Здійснює прямолінійний зворотно-поступальний рух усередині циліндра під тиском розширюваної пари.
2. **Шатун (Connecting rod):** Стрижень, який шарнірно з'єднує прямолінійно рухомий крейцкопф із кривошипом. Здійснює складний плоскопаралельний рух.
3. **Кривошип (Crank):** Ланка, яка здійснює повнообертовий рух навколо нерухомої осі (головного вала).

3.2. Динаміка "мертвих точок" та маховик

Математичний аналіз кінематики КШМ виявляє критичну інженерну проблему — наявність "мертвих точок" (Dead centers).

- Це крайні положення (ВМТ і НМТ), коли вісь поршня, шатун і кривошип вишиковуються в одну пряму лінію. У цей момент сила тиску пари на поршень, якою б великою вона не була, створює нульовий крутний момент на головному валу ($M = F \cdot R \cdot \sin(\alpha)$, де $\alpha = 0^\circ$ або 180° , отже $\sin(\alpha) = 0$). Механізм просто заклинить, якщо він зупиниться в цій позиції.
- **Рішення (Махове колесо):** Щоб подолати мертві точки та згладити нерівномірність крутного моменту, інженери насаджували на головний вал масивний чавунний **маховик** (Flywheel). Завдяки колосальному моменту інерції ($I = m \cdot R^2$), маховик накопичував кінетичну енергію ($E_k = \frac{I\omega^2}{2}$) на робочому такті і за інерцією "протягував" механізм через мертві точки, забезпечуючи плавне, неперервне обертання трансмісії заводу.

Розділ 4. Впровадження парових приводів у вугільній промисловості та металургії

Впровадження парових приводів стало критично необхідним для виживання та масштабування ключових галузей Донбасу.

4.1. Вугільна промисловість: шахтні підйомники та насоси

Шахти XIX століття опускалися на сотні метрів під землю, перетинаючи підземні водоносні горизонти.

- **Парові насоси (Водовідлив):** Без постійного відкачування води шахти затоплювало за лічені дні. Для вирішення цієї проблеми застосовувалися потужні парові балансирні насоси (нащадки машини Ньюкомена). Паровий циліндр через гігантський балансир (Beam) підіймав важку штангу насоса, що тягнулася на дно шахти. Гідродинамічна ефективність цих машин врятувала вугільну промисловість Донбасу від затоплення.
- **Шахтні підйомники (Кліті):** Ручний або кінний коловорот (ворот) вже не міг швидко підіймати важкі вагонетки з вугіллям із глибоких горизонтів. Впровадження парових підймальних машин (Steam winders) з потужними лебідками і КШМ дозволило механізувати вертикальний транспорт. Інженери розробили спеціальні **кулісні реверсивні механізми** (наприклад, куліса Стефенсона), які дозволяли машиністу швидко змінювати напрямок обертання парової машини, опускаючи або підіймаючи шахтну кліть.

4.2. Металургія: повітродувки та парові молоти

На металургійних гігантах Півдня і Сходу України пара стала вирішальним фактором виробництва.

- **Доменне дуття:** Виплавка десятків тонн чавуну в доменній печі вимагала подачі величезного об'єму кисню для підтримки температури понад 1500°C . М'язові ковальські міхи замінили **паровими повітродувками**. Паровий поршень через загальний шток приводив у дію величезний компресорний циліндр, що безупинно нагнітав повітря у фурми доменної печі.
- **Парові молоти:** Ковання гігантських сталевих деталей (осей для локомотивів, валів для пароплавів, артилерійських гармат) потребувало зусиль у десятки тонн. Винахідник Джеймс Несміт створив паровий молот: поршень підіймав масивну падаючу частину (бабу) високо вгору (потенційна енергія), а потім пара під високим тиском впускалася у верхню частину циліндра, додаючи свою силу до гравітації, здійснюючи удар колосальної кінетичної енергії. Оператор парового молота за допомогою золотникового

механізму міг настільки точно керувати силою удару, що міг як розплющити розпечену сталеву болванку товщиною у метр, так і легенько розбити шкаралупу горіха, не пошкодивши ядро.

Висновки

Впровадження парових машин та перехід до машинної ери у XIX столітті кардинально змінили економічний, технологічний і соціальний ландшафт Півдня та Сходу України. Паровий привід став автономним, незалежним від природних стихій двигуном, який дозволив перенести промисловість безпосередньо до сировинних баз, запустивши ланцюгову реакцію розвитку металургії, вуглевидобування та важкого машинобудування на Донбасі.

Для сучасної прикладної механіки конструкція парової машини стала колискою інженерного аналізу. Кінематика кривошипно-шатунного механізму, розв'язання проблеми мертвих точок за допомогою маховиків, розрахунок кулісних реверсивних систем та вивчення термодинамічних циклів — усі ці знання, отримані в ході промислової революції, сьогодні становлять фундаментальний базис для проектування двигунів внутрішнього згоряння, компресорів, насосів та складних промислових агрегатів. Парова машина не просто замінила мускульну силу, вона народила сучасну професію інженера-механіка, озброєного математичним апаратом, законами термодинаміки та теорією міцності.

ЛЕКЦІЯ 10. ТЕОРІЯ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН: ФОРМУВАННЯ НАУКОВИХ ШКІЛ ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІКИ (ХАРКІВ, КИЇВ, ЛЬВІВ)

Анотація: Лекція присвячена переходу від емпіричного конструювання до науково обґрунтованого проектування механічних систем. Розглядається процес становлення фундаментальної науки про машини в Україні у XIX – на початку XX століття. Детально аналізується внесок українських наукових шкіл (Харкова, Києва та Львова) у розвиток теорії механізмів і машин (ТММ), кінематики, динаміки та теорії міцності (опору матеріалів). Висвітлюється роль перших вітчизняних політехнічних інститутів у створенні спеціалізованих кафедр та формуванні нової генерації технічної еліти, здатної розв'язувати надскладні інженерні задачі індустріальної епохи.

Вступ. Від ремісничої інтуїції до диференціальних рівнянь

Промислова революція та масове впровадження парових машин виявили критичну проблему: інтуїтивний (ремісничий) підхід до створення машин вичерпав себе. Паровози, що рухалися з небувалими раніше швидкостями, масивні турбіни та металургійні прокатні стани зазнавали величезних динамічних навантажень. Деталі, виготовлені "на око" з багаторазовим запасом міцності, робили машини надто важкими і неефективними, а недостатньо міцні елементи призводили до катастрофічних аварій — розривів парових котлів, руйнування мостів та розносу маховиків через відцентрові сили.

Виникла життєва потреба у математичному та фізичному обґрунтуванні кожного інженерного рішення. Інженерія мала перетворитися на точну науку. Саме в цей період формується **Теорія механізмів і машин (ТММ)** та **Опір матеріалів** як самостійні фундаментальні дисципліни. Для України цей процес став епохальним: створення потужних науково-освітніх центрів у Львові, Харкові та Києві заклало фундамент вітчизняного машинобудування, інтегрувавши українських вчених у світовий інженерний авангард.

Розділ 1. Становлення фундаментальної науки про машини в Україні

До середини XIX століття машини проектувалися шляхом спроб і помилок. Становлення фундаментальної науки про машини означало перехід до абстрактних математичних моделей.

1.1. Відокремлення ТММ як самостійної науки

Теорія механізмів і машин (ТММ) сформувалася як наука, що вивчає будову, кінематику та динаміку механізмів у зв'язку з їхнім аналізом та синтезом.

- **Структурний аналіз:** Науковці почали класифікувати механізми не за їхнім призначенням (млин, pompa, годинник), а за їхньою кінематичною структурою (важільні, кулачкові, зубчасті передачі). Було введено поняття "кінематична пара" та "кінематичний ланцюг".
- **Кінематика без урахування мас:** Першим етапом проектування став розрахунок траєкторій, швидкостей і прискорень точок механізму виключно геометричними методами, не враховуючи сили, що викликають цей рух.

- **Динамічний аналіз:** Зростання швидкостей машин призвело до появи значних сил інерції ($F = m \cdot a$). Науковці почали застосовувати принцип д'Аламбера для кінестатичного розрахунку механізмів, зводячи складні динамічні задачі до статичних шляхом додавання векторів сил інерції.

1.2. Розвиток лабораторної бази

Фундаментальна наука не могла розвиватися лише на папері. У новостворених інститутах почали відкриватися перші лабораторії механіки, оснащені тензометрами, пресами для випробування на розтяг і стиск, а також приладами для фіксації вібрацій (вібрографами). Це дозволило отримувати точні емпіричні дані для підтвердження математичних гіпотез.

Розділ 2. Внесок українських вчених у розвиток теорії міцності, кінематики та динаміки механізмів

Наукові школи, що сформувалися в Україні, здійснили колосальний внесок у розв'язання ключових проблем тогочасного машинобудування.

2.1. Теорія міцності матеріалів (Опір матеріалів)

Завданням опору матеріалів є розрахунок інженерних конструкцій на міцність, жорсткість та стійкість. Вітчизняні вчені розробили новаторські підходи:

- **Степан Тимошенко:** Видатний вчений-механік, чий творчий та науковий шлях нерозривно пов'язаний із Київським політехнічним інститутом. Його праці стали світовою класикою. Тимошенко розробив **теорію згину балок** (Timoshenko beam theory), яка, на відміну від класичної моделі Ейлера-Бернуллі, враховувала деформацію зсуву та інерцію обертання поперечних перерізів. Це стало критично важливим для розрахунку товстих балок та високочастотних вібрацій у мостобудуванні та суднобудуванні. Його праці з теорії пружності та стійкості конструкцій (buckling) дозволили запобігати раптовим обвалам металевих каркасів будівель і мостів.
- **Вивчення втоми металів:** Розвиток залізничного транспорту виявив проблему руйнування осей вагонів при навантаженнях, значно менших за границю текучості. Дослідники київської та харківської шкіл активно вивчали природу циклічних напружень та будували криві втоми (криві Велера), встановлюючи границю витривалості для різних марок сталі.

2.2. Кінематика та динаміка механізмів

- **Балансування мас:** З появою швидкохідних парових турбін і потужних локомотивів виникла проблема вібрацій. Незбалансовані обертові маси (наприклад, кривошипи та шатуни) створювали відцентрові сили, що руйнували підшипники. Вітчизняні інженери розробляли математичні методи статичного та динамічного балансування роторів, розраховуючи масу та кут встановлення противаг на колінчастих валах.
- **Теорія коливань:** Динаміка машин почала враховувати пружність самих ланок механізму. Вчені досліджували явища резонансу у валах (критичні швидкості обертання), що дозволило створювати безпечні та надійні високооборотні приводи для електростанцій та промислових цехів.

Розділ 3. Створення спеціалізованих кафедр у політехнічних інститутах та формування вітчизняної інженерної еліти

Розвиток науки неможливий без інституціоналізації. Найбільшим досягненням кінця XIX століття стало створення системи вищої технічної освіти, яка інкорпорувала ці фундаментальні дисципліни у навчальний процес.

3.1. Тріада вітчизняних політехнічних шкіл

Становлення шкіл прикладної механіки відбувалося на базі трьох потужних центрів:

1. **Львівська політехніка (Технічна академія, засн. 1844 р.):** Один із найстаріших технічних університетів Європи. Тут формувалася потужна школа будівельної механіки та мостобудування. Інженери Львівської політехніки розраховували складні металеві ферми залізничних мостів Галичини та Карпат, застосовуючи передові методи графічної статики.
2. **Харківський практичний технологічний інститут (засн. 1885 р.):** Центр розвитку машинобудівної науки, що забезпечував інженерними кадрами індустриальний Донбас.

Особлива увага тут приділялася термодинаміці парових котлів, технології металів та динаміці гірничошахтного обладнання.

3. **Київський політехнічний інститут (засн. 1898 р.):** Створений за зразком найкращих європейських вищих технічних шкіл (Еколь Політехнік). Від самого початку в КПІ були закладені потужні фізико-математичні традиції.

3.2. Роль спеціалізованих кафедр (В. Кирпичов) Особливу роль у створенні Харківського та Київського інститутів відіграв видатний вчений-механік **Віктор Кирпичов**. Він став першим директором обох закладів. Завдяки йому в інститутах були створені **перші спеціалізовані кафедри прикладної механіки та опору матеріалів**.

- Кирпичов запровадив принцип: інженер повинен не просто завчити емпіричні формули, а володіти глибоким розумінням вищої математики, аналітичної механіки та фізики.
- На цих кафедрах студенти виконували складні курсові проєкти: розраховували деталі машин на втому, креслили епюри згинальних моментів для валів, проєктували зубчасті передачі з евольвентним профілем зуба.

3.3. Формування інженерної еліти (Технократії) Наслідком роботи цих інститутів стало формування нової суспільної верстви — **вітчизняної технічної еліти**.

- Звання "інженер-механік" або "інженер-технолог" стало надзвичайно престижним. Студенти політехнічних інститутів носили спеціальну уніформу, що підкреслювало їхній особливий статус у суспільстві.
- Це були люди нового типу — технократи, озброєні логікою, математичним аналізом та відповідальністю. Саме випускники Харкова, Києва та Львова у ХХ столітті проєктували перші літаки, розбудовували залізничні магістралі, зводили гідроелектростанції (зокрема ДніпроГЕС) та керували металургійними гігантами.

Висновки

Створення наукових шкіл прикладної механіки у Харкові, Києві та Львові знаменувало перехід української інженерії від ремісничої емпірики до світового академічного рівня. Вітчизняні вчені здійснили фундаментальний внесок у розробку теорії механізмів, дослідження динаміки швидкохідних машин та створення сучасних теорій міцності (зокрема, праці С. Тимошенка з опору матеріалів та стійкості пружних систем).

Для сучасного студента розуміння цього етапу є критично важливим. Усі сучасні комп'ютерні методи проєктування (CAD/CAE системи), програми для розрахунку методом скінченних елементів (FEA) та симуляції кінематики базуються на диференціальних рівняннях та законах статички і динаміки, які були сформульовані та введені в інженерну практику науковими школами наших політехнічних інститутів понад століття тому. Створення спеціалізованих кафедр не просто дало країні кадри, воно сформувало інтелектуальну еліту, здатну брати відповідальність за надійність і безпеку складних технічних систем, що є головним моральним та професійним обов'язком інженера-механіка і сьогодні.

ЛЕКЦІЯ 11. ДИНАМІКА ТА МІЦНІСТЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ЕПОХИ ІНДУСТРІАЛІЗАЦІЇ (ЗАВОДИ ЕЛЬВОРТІ ТА ІН.)

Анотація: Лекція розкриває засади інженерного проєктування та кінематичного аналізу аграрної техніки в епоху масової індустріалізації (кінець ХІХ – початок ХХ ст.). Здійснюється ретроспективний огляд становлення вітчизняного сільськогосподарського машинобудування на прикладі заводів Ельворті. Детально розглядається еволюція ґрунтообробної, посівної та збиральної техніки з акцентом на кінематику механізмів кінних сівалок (дозувальні апарати) та складних збиральних агрегатів (кривошипно-повзункові механізми різальних апаратів). Аналізується специфіка розрахунків аграрних машин на міцність в умовах високих динамічних навантажень та вплив механізації на продуктивність економіки.

Вступ. Сільськогосподарська механіка як специфічна галузь машинобудування

Розвиток важкого машинобудування на Півдні та Сході України створив технологічну базу для розв'язання ще однієї глобальної проблеми — механізації аграрного сектору. Сільськогосподарське машинобудування є унікальною галуззю прикладної механіки. На відміну від фабричних верстатів, які працюють у стабільних цехових умовах на жорстких

фундаментах, аграрні машини функціонують у вкрай агресивному, нестабільному та непередбачуваному середовищі.

Для інженера-проектувальника ґрунт є надзвичайно складним об'єктом: його щільність, вологість та питомий опір постійно змінюються. Машини зазнають постійних вібрацій, абразивного зносу (через пил і пісок), ударних навантажень (при зіткненні з камінням чи корінням) та впливу атмосферних опадів. Це вимагало від інженерів епохи індустріалізації створення механізмів, які б поєднували високу кінематичну точність (наприклад, для рівномірного висіву насіння) з колосальною міцністю, надійністю та простотою обслуговування в польових умовах.

Розділ 1. Масове виробництво аграрної техніки на українських заводах (Феномен Ельворті)

Наприкінці XIX століття Україна (зокрема її південні та центральні регіони) остаточно утвердилася як "житниця Європи". Екстенсивний шлях збільшення площ посівів вичерпав себе через гостру нестачу робочих рук під час посівної та збиральної кампаній. Виник колосальний ринковий попит на механізацію.

1.1. Перехід від кустарних майстерень до масового виробництва

Відповіддю на попит стала поява спеціалізованих машинобудівних гігантів. Найяскравішим прикладом є завод братів Ельворті (Elvortі), заснований у 1874 році в Єлисаветграді (нині Кропивницький).

- **Інженерна стандартизація:** Завод Ельворті став піонером у впровадженні масового серійного виробництва. Замість ручного індивідуального припасування деталей (що робило ремонт у полі неможливим), завод перейшов на випуск деталей за суворими кресленнями з використанням лекал і калібрів. Це запровадило в аграрну інженерію фундаментальний принцип **взаємозамінності деталей**.
- **Технологічний цикл:** Підприємство мало власні чавуноливарні, ковальські, токарні та складальні цехи, оснащені найсучаснішими паровими машинами. Використання машинного лиття та штампування дозволило виробляти складні просторові деталі (відвали плугів, маточини коліс, шестерні) багатотисячними тиражами зі стабільною якістю. До початку Першої світової війни завод Ельворті став одним із найбільших виробників аграрної техніки у Європі, випускаючи десятки тисяч сівалок на рік.

Розділ 2. Еволюція техніки: від простої кінематики до складних механізованих агрегатів

Довгий час тягловою силою залишався кінь, проте механізми, які він тягнув, еволюціонували від простих пасивних знарядь до складних кінематичних машин.

2.1. Посівна техніка: кінематика рядової сівалки

Головним інженерним завданням при посіві є забезпечення рівномірного розподілу насіння по площі та на задану глибину. Ручна сівба давала величезний відсоток втрат. Винахід кінної рядової сівалки (яку масово випускав завод Ельворті) розв'язав цю проблему завдяки точній кінематиці.

- **Джерело енергії (Колесо як ротор):** Сівалка не мала власного двигуна. Обертальний момент знімався безпосередньо з **ходових (опорних) коліс** сівалки під час її руху по полю.
- **Зубчаста трансмісія:** Обертання від осі колеса через систему зубчастих шестерень передавалося на вал висівного апарату. Інженери використовували коробки передач (змінні шестерні), що дозволяло змінювати передаточне відношення (i) і, відповідно, швидкість обертання висівного вала. Це давало змогу точно налаштовувати **норму висіву** (кількість кілограмів насіння на гектар).
- **Дозувальний (катушковий) апарат:** На валу розташовувалися катушки з жолобками. Обертаючись усередині насінневого ящика, вони захоплювали суворо дозовану порцію насіння і скидали її у насіннепроводи. Ця система гарантувала жорстку синхронізацію: що швидше йдуть коні, то швидше обертаються колеса і катушки, тому відстань між насінинами в рядку завжди залишалася незмінною, незалежно від швидкості руху.

2.2. Збиральна техніка: перетворення рухів у жатках і снопов'язалках

Збирання врожаю (жнива) вимагало найбільших витрат праці. Заміна ручної коси на кінну жатку вимагала впровадження у сільське господарство складних плоских механізмів.

- **Кінематика різального апарату:** Різальний апарат жатки працює за принципом ножиць. Він складається з нерухомих пальців та рухомої ножової штаби з трикутними сегментами, яка здійснює швидкий зворотно-поступальний рух.
- **Просторова трансмісія:** Рух знову знімався з головного опорного колеса (яке для кращого зчеплення з ґрунтом мало металеві шипи — ґрунтозачеми). Через систему конічних зубчастих коліс обертання передавалося на вал, розташований перпендикулярно до осі колеса (паралельно до напрямку руху).
- **Кривошипно-повзунковий механізм:** На кінці цього вала встановлювався кривошип (або ексцентрик). Через довгий дерев'яний шатун (шатун робили з дерева (ясеня) для гасіння високочастотних вібрацій) обертальний рух перетворювався на зворотно-поступальний рух ножової штаби. Механізм працював із високою частотою (до кількох сотень циклів на хвилину), вимагаючи точного балансування та змащення.
- **Снопов'язальний апарат:** Вершиною аграрної механіки кінної ери стала снопов'язалка (Binder). Окрім зрізання стебел, машина за допомогою системи полотняних транспортерів подавала зрізаний хліб на спеціальний стіл, де складний просторовий кулачковий механізм (в'язальний апарат конструкції Еплбі) автоматично формував сніп, обв'язував його шпагатом, зав'язував вузол, обрізав нитку і викидав сніп на поле. Це був справжній механічний комп'ютер XIX століття.

Розділ 3. Динаміка та міцність сільськогосподарських машин в умовах індустріалізації

Перехід до механізованого обробітку, а згодом — і до тракторної тяги, радикально змінив характер навантажень на деталі машин.

3.1. Ударні навантаження та динамічний розрахунок

Швидкість руху кінної жатки або багатокорпусного плуга була значно вищою за швидкість ручного обробітку. Коли леміш плуга натрапляв на прихований камінь на швидкості 5-7 км/год, виникало пікове ударне навантаження. Закони динаміки диктували необхідність захисту рами від руйнування.

- Інженери почали застосовувати **запобіжні пристрої**: зрізні болти (shear bolts), які розраховувалися на зріз при строго визначеному критичному зусиллі, або пружинні механізми (spring-trip beams), які дозволяли корпусу плуга відхилитися назад при ударі і потім повернутися в робоче положення. Це рятувало дорогі деталі від деформації.

3.2. Матеріалознавство: від чавуну до легованих сталей

Ранні аграрні машини мали важкі чавунні литі деталі (шестерні, зірочки). Чавун чудово виливається і чинить опір стиску, але він крихкий і погано витримує удари та згин (розтяг).

- В епоху індустріалізації заводи Ельворті та інші підприємства (завод Грієвза у Бердянську, завод Леша і Вальмана на Хортиці) почали масово переходити на використання **катаної сталі**, сталевих профілів (швелерів, кутників) та легованих сталей для швидкозношуваних деталей. Лемеші та різальні сегменти почали піддавати складному термічному гартуванню (цементації), щоб забезпечити твердість леза за збереження пружності серцевини деталі (для запобігання крихкому зламу).

Розділ 4. Вплив вітчизняного сільськогосподарського машинобудування на продуктивність аграрного сектору

Створення потужної бази сільськогосподарського машинобудування на Півдні України мало ефект мультиплікатора для всієї економіки імперії, а згодом і республіки.

1. **Вивільнення людських ресурсів:** Механізація посіву, а головне — збирання врожаю (одна кінна жатка замінювала працю 10-15 косарів), розв'язала проблему сезонного дефіциту робочої сили. Це дало змогу вивільнити колосальну кількість людей, які перейшли працювати у фабрично-заводський сектор міст (на ті ж металургійні та машинобудівні заводи).
2. **Розширення площ орних земель:** Застосування багатокорпусних механізованих плугів дозволило розорати важкі цілинні та перелогові землі південних степів, які фізично неможливо було обробити примітивним ралом. Україна перетворилася на найбільшого експортера зерна.

3. **Агротехнічна революція:** Сівалки Ельворті дозволили точно дозувати насіння та вносити його на оптимальну глибину у зволожений шар ґрунту, що значно підвищило схожість та врожайність.
4. **Становлення інженерної експлуатаційної служби:** Складна техніка вимагала кваліфікованого обслуговування. Почали формуватися мережі земських агрономічних складів і ремонтних майстерень, що заклало основу майбутніх машинно-тракторних станцій (МТС) та розвинуло технічну грамотність сільського населення.

Висновки

Сільськогосподарське машинобудування епохи індустріалізації стало одним із найважливіших полігонів для впровадження законів прикладної механіки у повсякденну масову практику. Трансформація від простої кінної сівалки до складних механізованих агрегатів (жаток, снопов'язалок, плугів із запобіжниками) продемонструвала здатність інженерів проєктувати системи, що надійно працюють в екстремальних умовах змінного ґрунтового опору та циклічних ударних навантажень.

Діяльність вітчизняних підприємств, таких як завод Ельворті, не лише забезпечила перехід на масове стандартизоване виробництво взаємозамінних деталей, а й стала головним технологічним драйвером, що кардинально підвищив продуктивність українського аграрного сектору. Для сучасного фахівця ці історичні зразки є класичними прикладами перетворення рухів (через ексцентрики та зубчасті передачі), що заклали архітектуру сучасних зернозбиральних комбайнів та автоматизованих посівних комплексів.

ЛЕКЦІЯ 12. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА В СУДНОБУДУВАННІ ТА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ: РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ТА ВТОМА МАТЕРІАЛІВ

Анотація: Лекція розкриває інженерні засади інтенсивного розвитку транспортного машинобудування у XIX – на початку XX століття. Здійснюється механіко-математичний аналіз надійності мобільних парових установок на прикладі паротягів (заводи Харкова, Луганська) та пароплавів (верфі Миколаєва, Херсона) вітчизняного виробництва. Детально розглядається еволюція інженерного проєктування: перехід до складних розрахунків на міцність і жорсткість в умовах нестационарних навантажень. Особлива увага приділяється вивченню небезпечного явища втоми матеріалів металевих конструкцій, що виникає під дією циклічних динамічних навантажень, та методам боротьби з ним.

Вступ. Транспортна революція як виклик для класичної механіки

Поява парової машини вирішила проблему генерації енергії, проте її використання на транспорті поставило перед інженерами принципово нові завдання. Стаціонарний паровий двигун на фабриці міг мати величезну масу, кріпився до масивного цегляного фундаменту і працював у відносно стабільних умовах. Натомість транспортний засіб (паровоз чи пароплав) є автономною мобільною системою, яка несе свій власний двигун, запас палива та корисний вантаж.

Транспортна механіка вимагала радикального зниження питомої маси конструкцій (відношення маси до потужності) із одночасним забезпеченням високої надійності в умовах сильних вібрацій, динамічних ударів та складних просторових деформацій. Локомотив, що рухається нерівними рейками, або пароплав, що долає морські хвилі, зазнають таких колосальних змінних навантажень, які неможливо було описати законами класичної статyki. Для розв'язання цих проблем інженерам довелося розробити нові методи розрахунків на міцність і жорсткість. Це стимулювало швидкий розвиток прикладної механіки та опору матеріалів, що дозволило проєктувати безпечні та ефективні транспортні засоби.

Розділ 1. Інтенсивний розвиток транспортного машинобудування на українських землях
У другій половині XIX століття економіка Півдня та Сходу України потребувала ефективних шляхів транспортування вугілля, залізної руди та зерна. Відповіддю став інтенсивний розвиток транспортного машинобудування. Транспортна мережа стала кровоносною системою індустріалізації.

1.1. Залізничний бум та локомотивобудування

Будівництво залізниць (зокрема, Катерининської залізниці, що з'єднала Кривбас і Донбас) вимагало величезної кількості рухомого складу. Почали створюватися потужні центри локомотивобудування.

- **Луганський паровозобудівний завод** (заснований Г. Гартманом у 1896 р.) швидко став одним із найпотужніших підприємств Європи. Тут випускали важкі вантажні паротяги (наприклад, серії "Е", що стали наймасовішими у світі).
- **Харківський паровозобудівний завод** (ХПЗ, заснований у 1895 р.) спеціалізувався на випуску паротягів, парових котлів та складних механізмів.

1.2. Розвиток суднобудування (Чорноморський басейн)

Експорт товарів стимулював перехід від парусного дерев'яного флоту до сталевих пароплавів.

- **Верфі Миколаєва та Херсона** стали флагманами вітчизняного суднобудування. У Миколаєві (на заводах "Наваль" та Адміралтействі) будували як потужні комерційні пароплави-вуглевози, так і надскладні військові кораблі (броненосці), які являли собою плаваючі фортеці, насичені паровими, гідравлічними та електричними машинами.

Розділ 2. Дослідження надійності паротягів та пароплавів вітчизняного виробництва

Проектування транспортних засобів вимагало розв'язання унікальних для кожної галузі динамічних задач, які безпосередньо впливали на безпеку руху.

2.1. Механіка та надійність паротягів (Харків, Луганськ)

Локомотив є надзвичайно складною динамічною системою. Головним інженерним викликом було балансування мас.

- **Кінематика паророзподілу:** Заводи Харкова та Луганська випускали паротяги з передовими кулісними механізмами (наприклад, механізмом Вальсхарта). Це просторовий важільний механізм, який автоматично змінював фази впуску та випуску пари залежно від положення поршня, що дозволяло економно використовувати енергію розширення пари та здійснювати реверс (задній хід).
- **Динамічне балансування:** Шатуни та кривошипи паротяга здійснюють складний плоскопаралельний рух. Незбалансовані маси викликають величезні відцентрові сили та сили інерції. Якщо їх не врівноважити, виникає явище "галоупування" (поздовжні коливання) та "виляння" (поперечні коливання) локомотива. При досягненні резонансної швидкості важкий паротяг міг просто зіскочити з рейок або зруйнувати залізничне полотно своїми ударами. Тому інженери почали відливати колісні центри із масивними противагами, математично розраховуючи їхню масу для компенсації інерції шатунно-поршневої групи.

2.2. Механіка та гідродинаміка пароплавів (Миколаїв, Херсон)

Суднобудування висувало абсолютно інші вимоги до міцності матеріалів.

- **Двигуни та рушії:** Старі гребні колеса замінювалися на гвинтові рушії. Гребний гвинт працює у щільному середовищі (воді). Передача колосального крутного моменту від парової машини, що знаходилася в центрі судна, до гвинта на кормі вимагала створення довгих гребних валів (іноді десятки метрів). Ці вали розраховувалися на складний опір: одночасне кручення та поздовжній стиск (оскільки гвинт штовхав судно вперед, спираючись на завзятий підшипник).
- **Корпус як просторова балка:** Сталевий корпус пароплава з точки зору будівельної механіки є величезною пустотілою балкою коробчастого перерізу. Коли судно йде по хвилях, воно зазнає загального поздовжнього згину.
 - *Прогин на хвилі (Sagging):* Коли ніс і корма знаходяться на гребенях хвиль, а середина — у впадині, верхня палуба зазнає колосального стиску, а днище — розтягу.
 - *Перегин (Hogging):* Коли середина судна на гребені хвилі, а ніс і корма провисають, палуба розтягується, а днище стискається.

Інженери миколаївських верфей розраховували товщину сталеві обшивки, шпангоутів і стрингерів так, щоб корпус міг витримувати ці змінні навантаження без перелому, зберігаючи при цьому необхідну плавучість (закон Архімеда).

Розділ 3. Впровадження нових методів розрахунків на міцність і жорсткість

Для проектування безпечного транспортного засобу класичної статички (умов рівноваги $\Sigma F = 0$, $\Sigma M = 0$) було вже недостатньо. Відбувалося впровадження нових методів розрахунків на міцність і жорсткість.

1. **Розрахунок на міцність (Strength):** Забезпечення здатності деталі витримувати навантаження без руйнування та без виникнення незворотних (пластичних) деформацій. Інженери почали застосовувати теорії міцності (наприклад, гіпотезу найбільших дотичних напружень) для розрахунку деталей, які зазнають складного напруженого стану (наприклад, колінчастий вал паровоза одночасно згинається і скручується).
2. **Розрахунок на жорсткість (Stiffness):** Здатність деталі опиратися зміні форми (пружній деформації). У точних механізмах парових машин жорсткість іноді важливіша за міцність. Наприклад, якщо поршневий шток паровоза вигнеться під час роботи більше ніж на частки міліметра, він порушить герметичність сальникових ущільнень, і пара вирветься назовні. Тому діаметр штока розраховувався не лише на міцність при стиску, але й на поздовжній згин (формула Ейлера) для забезпечення абсолютної геометричної стабільності.

Розділ 4. Вивчення небезпечного явища втоми матеріалів металевих конструкцій

Найбільшим технологічним і науковим шоком епохи залізниць стало явище, яке не вписувалося у класичні теорії міцності. Сталеві деталі (осі вагонів, шатуни, ресори), які за статичними розрахунками мали величезний запас міцності (витримували навантаження в рази більше за робоче), раптово ламалися в процесі експлуатації без жодних видимих попередніх деформацій.

Це небезпечне явище отримало назву **втома матеріалів** металевих конструкцій. Воно виникає під дією циклічних (змінних у часі) навантажень.

4.1. Механізм виникнення втоми металу (на прикладі осі паровоза)

Розглянемо залізничну вісь (вісь колісної пари). Вага вагона тисне на підшипники (букси) по краях осі, намагаючись зігнути її "дугою".

- У будь-який момент часу верхні волокна сталеві осі стискаються, а нижні — розтягуються.
- Але вісь обертається разом із колесом! Тому кожна "точка" на поверхні осі за один оберт колеса проходить шлях від зони максимального стиску до зони максимального розтягу і назад.
- Якщо паротяг проїжджає 1000 км, кожна точка на осі зазнає мільйонів таких повних циклів зміни напружень (знакозмінне навантаження).

4.2. Фізика руйнування та концентратори напружень

Під дією таких циклів навіть при відносно невеликих зусиллях на мікроскопічному рівні (у кристалічній решітці металу) починають накопичуватися незворотні пошкодження — дислокації.

1. **Зародження тріщини:** Процес майже завжди починається з поверхні деталі, особливо там, де є **концентратори напружень** (мікроподряпини, різкі переходи діаметрів, отвори під заклепки, різьба). Тут місцеві напруження багаторазово зростають.
2. **Розвиток тріщини:** З кожним обертом (циклом) мікротріщина повільно проростає всередину металу. Деталь послаблюється. Цей процес непомітний для ока.
3. **Раптовий злам:** Коли живий (неушкоджений) переріз деталі стає занадто малим, щоб витримати робоче навантаження, відбувається миттєвий крихкий злам.

4.3. Інженерні методи боротьби зі втомою Вивчення втоми матеріалів (завдяки працям таких вчених як А. Велер, який побудував перші "криві втоми") дозволило інженерам розробити ефективні методи протидії:

- **Зниження концентрації напружень:** Замість різких прямих кутів на переходах валів (галтелях) почали робити плавні заокруглення великого радіуса, які рівномірно розподіляли силові лінії.
- **Якість поверхні:** Поверхні відповідальних деталей (шатунів, осей) почали ретельно шліфувати та полірувати, ліквідуючи мікроподряпини як потенційні осередки зародження тріщин. Деталі піддавали поверхневого зміцненню (цементації,

азотуванню, обкатці роликами), щоб створити на поверхні залишкові напруження стиску, які закривають мікротріщини.

- **Дефектоскопія:** Для паротягів і пароплавів ввели жорсткі регламенти регулярного огляду деталей за допомогою перших методів неруйнівного контролю (дефектоскопії) для виявлення втомних тріщин на ранніх стадіях.

Висновки

Інтенсивний розвиток транспортного машинобудування в епоху індустріалізації став суворим випробуванням для прикладної механіки. Створення потужних паротягів на заводах Харкова та Луганська, а також будівництво важких пароплавів на верфях Миколаєва та Херсона вимагали від інженерів переходу до складних розрахунків на міцність і жорсткість просторових динамічних систем.

Дослідження явища втоми матеріалів здійснило революцію в розумінні опору металів. Інженери усвідомили, що для рухомих механізмів статичного запасу міцності недостатньо — критично важливим є врахування циклічних навантажень та ліквідація концентраторів напружень. Для сучасного фахівця з прикладної механіки ці історичні досягнення становлять фундамент науки про надійність машин. Закони динамічного балансування, методи запобігання втомним руйнуванням металоконструкцій та принципи неруйнівної дефектоскопії, закладені в еру паровозів, сьогодні залишаються основоположними правилами під час проектування високошвидкісних поїздів, літаків, космічних апаратів та промислових газових турбін.

ЛЕКЦІЯ 13. МЕХАНІКА КОСМІЧНОГО ПОЛЬОТУ ТА АВІАБУДУВАННЯ: ДОСЯГНЕННЯ КБ «АНТОНОВ» ТА «ПІВДЕНМАШ»

Анотація: Лекція розкриває найвищі досягнення вітчизняної інженерної думки у другій половині XX — на початку XXI століття. Здійснюється глибокий аналіз механіки аерокосмічних систем на прикладі надважких транспортних літаків КБ «Антонов» та ракет-носіїв КБ «Південне» і заводу «Південмаш». Детально досліджуються інноваційні конструктивні рішення (ізогридні структури, багатоопорні шасі), сучасні методи розрахунку надійності (МСЕ) та специфіка застосування нових композитних і легких сплавів у ракетобудуванні. Оцінюється роль українських конструкторських бюро у формуванні світової аерокосмічної галузі та значення передових технологій зварювання для забезпечення структурної цілісності літальних апаратів.

Вступ. Аерокосмічна інженерія як абсолютний виклик для прикладної механіки

Якщо промислова революція вимагала від інженерів створення масивних і міцних машин із чавуну та сталі, то перехід до аерокосмічної ери кардинально змінив філософію конструювання. Авіація та космонавтика кинули виклик базовим парадигмам опору матеріалів: інженерам довелося навчитися створювати конструкції, які мають **екстремально високу міцність при екстремально низькій масі**.

У ракетобудуванні маса корисного навантаження становить лише 2–4% від стартової маси ракети (решта — паливо та сама конструкція). Будь-який зайвий кілограм у конструкції корпусу чи двигуна обходиться колосальними фінансовими витратами та зниженням ефективності. Аерокосмічна механіка оперує в умовах граничних навантажень: надзвукових аеродинамічних вібрацій, акустичних ударів, криогенних температур (рідкий кисень) та надвисоких температур у камерах згорання.

Подолання цих викликів зумовило перехід від класичної аналітичної механіки до складного комп'ютерного моделювання, створення композитних матеріалів та високоточних технологій з'єднання металів. Досягнення українських конструкторських бюро у цій сфері є найвищим проявом вітчизняної інженерної думки та фундаментальним внеском у світову технологічну скарбницю.

Розділ 1. Найвищі досягнення вітчизняної інженерної думки: КБ «Антонов» та «Південмаш»

Формування в Україні двох потужних аерокосмічних кластерів (у Києві та Дніпрі) дозволило державі увійти до елітного клубу країн, здатних проєктувати та виготовляти авіаційну та ракетну техніку повного циклу.

1.1. Авіаційний комплекс: КБ «Антонов» (Київ)

Спеціалізацією київського конструкторського бюро під керівництвом Олега Антонова (а згодом Петра Балабуєва) стало створення важких і надважких військово-транспортних та пасажирських літаків.

- **Ан-124 «Руслан» та Ан-225 «Мрія»:** Це шедеври світової авіаційної механіки. Ан-225 «Мрія» (з максимальною злітною масою 640 тонн) проєктувався спеціально для транспортування космічного корабля багаторазового використання «Буран» та блоків ракети «Енергія» на зовнішній підвісці.
- **Кінематика вантажних операцій:** Унікальність цих літаків полягає у їхній здатності до "присідання". Завдяки складній просторовій кінематиці багатовізкового шасі, літак може змінювати кліренс і кут нахилу фюзеляжу, а носова частина фюзеляжу підіймається вгору, перетворюючи літак на гігантський наскрізний тунель для самохідного завантаження надгабаритної техніки.

1.2. Ракетно-космічний комплекс: КБ «Південне» та завод «Південмаш» (Дніпро)

Під керівництвом видатних конструкторів (зокрема Михайла Янгеля та Володимира Уткіна) у Дніпрі була створена унікальна база ракетобудування.

- **Ракети-носії «Зеніт», «Циклон», «Дніпро»:** Серія «Зеніт» стала першою у світі ракетою, яка впровадила принцип "безлюдного старту" (повністю автоматизована кінематика підняття, заправки та запуску ракети на стартовому майданчику).
- **Орбітальна механіка:** Ракетні комплекси Дніпра дозволили виводити важкі супутники на низькі та геостационарні орбіти. Це вимагало бездоганного розуміння небесної механіки, динаміки польоту тіл змінної маси (рівняння Мещерського-Ціолковського) та розробки прецизійних гіроскопічних систем стабілізації для утримання ракети на заданій траєкторії.

Розділ 2. Аналіз інноваційних конструктивних рішень та методів розрахунку надійності

Створення аерокосмічних апаратів таких масштабів було б неможливим без впровадження революційних конструктивних рішень та переходу на нові математичні моделі розрахунку надійності.

2.1. Конструктивні інновації в ракетобудуванні (Вафельні / Ізогридні оболонки)

Стінка паливного бака ракети (яка одночасно є несучим фюзеляжем) має бути надзвичайно тонкою (іноді 2-3 мм), щоб зменшити вагу, але водночас витримувати колосальні навантаження: внутрішній тиск наддуву, поздовжній стиск від ваги корисного навантаження під час прискорення та аеродинамічний згин.

- **Ізогридна структура:** Інженери «Південмашу» застосували технологію фрезерування вафельного (ізогридного) фону. З товстої цільної плити алюмінієво-мідного сплаву хімічним або механічним фрезеруванням вибирали зайвий метал, залишаючи тонку обшивку, посилену інтегральними ребрами жорсткості у вигляді трикутників або ромбів. Ця геометрія радикально підвищувала стійкість оболонки до втрати стійкості (buckling), забезпечуючи міцність при мінімальній масі.

2.2. Запобігання втомному руйнуванню в авіації (КБ Антонов)

Фюзеляж транспортного літака — це гігантська посудина під тиском. При кожному зльоті (наборі висоти) фюзеляж "роздувається" від різниці тисків, а при посадці — стискається.

- Ці пульсації створюють жорсткі цикли втоми матеріалу. Метод **"Fail-Safe Design"** (безпечне руйнування), застосований інженерами, передбачав дублювання критичних вузлів. Якщо виникає мікротріщина в обшивці, її поширення зупиняється на спеціальних підсилювальних стрічках (стоперах).
- Для розрахунку застосовувався новітній на той час **Метод скінченних елементів (MSE / FEA)**. Складна просторова геометрія літака розбивалася на мільйони дрібних трикутників або тетраедрів (сітку), і для кожного елемента комп'ютер розраховував матрицю жорсткості та деформацій. Це дозволяло побачити зони концентрації напружень ще на етапі віртуального проєктування.

Розділ 3. Застосування нових матеріалів та технологій зварювання

Досягнення КБ «Антонов» та «Південмаш» неможливо відокремити від революції у матеріалознавстві та застосування передових технологій з'єднання деталей, розроблених у співпраці з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона.

3.1. Легкі сплави та Композитні матеріали у створенні літальних апаратів

- **Алюмінієво-літєві сплави:** Літій є найлегшим металом. Його додавання до алюмінію дозволило знизити густину сплаву на 10% і одночасно підвищити модуль пружності (жорсткість). Це забезпечило економію сотень кілограмів маси ракети.
- **Полімерні композиційні матеріали (ПКМ):** Застосування нових композитних матеріалів (вуглепластиків та склопластиків) здійснило прорив у конструюванні. З них почали виготовляти головні обтічники ракет, панелі хвостового оперення літаків, лопаті вентиляторів авіадвигунів. Механіка композитів принципово відрізняється від металів: вони є анізотропними (їхня міцність максимальна лише вздовж напрямку укладання вуглецевих волокон). Це дозволило інженерам проектувати деталі, "налаштовуючи" їхню міцність виключно у напрямку дії розрахункових векторів навантаження.

3.2. Аерокосмічне зварювання: забезпечення абсолютної надійності

У створенні ракет-носіїв механічне кріплення (заклепки чи болти) неприпустиме для паливних баків, оскільки воно не забезпечує герметичності для плинних кріогенних рідин (рідкого водню) та додає зайву вагу.

- **Автоматичне аргонодугове зварювання (TIG/MIG):** Тонкостінні оболонки з алюмінієвих сплавів зварювалися в середовищі інертних газів, щоб запобігти миттєвому окисленню металу та утворенню пор у зварному шві.
- **Електронно-променеве зварювання:** Для з'єднання надміцних титанових деталей застосовувався сфокусований пучок електронів у глибокому вакуумі. Цей метод дозволяє отримати дуже глибокий (до десятків міліметрів) і вузький зварний шов з мінімальною зоною термічного впливу, гарантуючи монолітність конструкції без залишкових теплових деформацій.

Розділ 4. Роль українських конструкторських бюро у становленні світової аерокосмічної галузі

Накопичений технологічний потенціал, передові методи розрахунку надійності та застосування новітніх матеріалів дозволили українським підприємствам стати невід'ємною частиною глобальної аерокосмічної індустрії.

1. **Міжнародні космічні програми:** Ракети-носії розробки КБ «Південне» стали базою для масштабних міжнародних проєктів. Проєкт **«Морський старт» (Sea Launch)** — унікальна інженерна концепція запуску ракети «Зеніт-3SL» зі спеціальної плавучої платформи на екваторі, що дозволяє максимально використати кінетичну енергію обертання Землі для збільшення корисного навантаження. Українські інженери також створюють основну конструкцію першого ступеня для американської ракети-носія **Antares** та розробляють двигуни для верхнього ступеня європейської ракети **Vega**.
2. **Глобальна логістика надважких вантажів:** Літаки КБ «Антонов» (зокрема парк авіакомпанії "Авіалінії Антонова") стали монополістами на світовому ринку перевезень унікальних вантажів. Транспортування промислових генераторів, турбін, супутників та навіть фюзеляжів інших літаків між континентами безпосередньо впливає на логістику світової енергетичної та космічної галузей. Українська авіаційна механіка стала інструментом розв'язання глобальних логістичних криз.

Висновки

Створення аерокосмічної техніки в КБ «Антонов» та на заводі «Південмаш» є найвищим тріумфом вітчизняної прикладної механіки. Перехід від масивних сталевих машин XIX століття до тонкостінних ізогридних оболонок, широкого застосування нових композитних матеріалів та високоточних зварювальних технологій дозволив створювати конструкції з безпрецедентним співвідношенням міцності до маси.

Сучасні методи розрахунку надійності (MCE), розроблені для забезпечення безвідмовності ракетних комплексів та надважких транспортних літаків, сьогодні стали золотим стандартом у всій світовій індустрії. Роль українських КБ у становленні світової аерокосмічної галузі

доводить, що високотехнологічна інженерія є найпотужнішим драйвером економічної незалежності та геополітичного престижу держави. Для майбутнього фахівця це означає, що фундаментальні знання з механіки, опору матеріалів та етики технічної діяльності здатні прокласти шлях до зірок.

ЛЕКЦІЯ 14. РОБОТОТЕХНІКА, ВЕРСТАТИ З ЧПК ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Анотація: Лекція присвячена глибокому аналізу переходу вітчизняного машинобудування до парадигми сучасної Індустрії 4.0. Здійснюється розгляд архітектури та кінематики високоточних систем числового програмного керування (ЧПК), а також принципів функціонування гнучких автоматизованих виробничих ліній. Особлива увага приділяється інтеграції комп'ютерних методів проєктування, інженерного аналізу та виробництва (CAD/CAM/CAE системи), що забезпечують комплексну оптимізацію механічних процесів і радикальне зниження ресурсомісткості промисловості.

Вступ. Еволюція механіки: від жорсткої кінематики до цифрового керування

Історія розвитку машинобудування — це шлях безперервної боротьби за підвищення точності та продуктивності. Якщо епоха промислової революції (XIX ст.) базувалася на жорсткій кінематиці, де рух інструмента визначався виключно механічними шаблонами, кулачками та шестернями, то друга половина XX століття принесла цифрову революцію. Механіка об'єдналася з електронікою та програмуванням, породивши нову дисципліну — **мехатроніку**. Сучасний верстат чи промисловий робот є складною кіберфізичною системою. У ній комп'ютер генерує цифрову траєкторію, сервоприводи перетворюють цифровий сигнал на фізичний рух, а високоточна кінематика інструмента безпосередньо впливає на матеріал заготовки. Розуміння цих процесів є критично важливим для сучасного фахівця з прикладної механіки. Від нього вимагається не лише знання опору матеріалів та теорії різання, але й уміння створювати цифрові двійники процесів, програмувати логічні контролери та оптимізувати роботу автоматизованих комплексів.

Розділ 1. Перехід до парадигми сучасної Індустрії 4.0

Українська промисловість, долаючи виклики модернізації та повоєнної відбудови, інтегрується у глобальний процес переходу до парадигми сучасної Індустрії 4.0 (Четвертої промислової революції).

1.1. Концепція кіберфізичних систем (CPS)

Основою Індустрії 4.0 є злиття фізичного виробництва з інформаційними технологіями. Якщо раніше верстат був ізольованим механізмом, то тепер він стає елементом **кіберфізичної системи**.

- Сенсори, встановлені на шпинделі, напрямних або безпосередньо на різці, у режимі реального часу збирають дані про температуру, вібрації (акустичну емісію) та крутний момент.
- Ці дані передаються через промисловий інтернет речей (IIoT) до хмарних платформ, де алгоритми штучного інтелекту аналізують їх, прогнозуючи знос інструмента (Predictive Maintenance) та автоматично коригуючи режими різання для уникнення браку або поломки.

1.2. Від масового виробництва до "Масової кастомізації" (Mass Customization)

Традиційні конвеєри XX століття були ефективними лише для випуску мільйонних партій однакових деталей. Переналагодження лінії вимагало тижнів зупинки заводу. Індустрія 4.0 забезпечує **гнучкість**. Завдяки цифровому керуванню, зміна продукції на верстаті відбувається миттєво — шляхом завантаження нової керуючої програми (G-коду). Це дозволяє рентабельно виготовляти унікальні, кастомізовані вироби (навіть одиничні екземпляри) зі швидкістю та собівартістю масового виробництва.

Розділ 2. Впровадження високоточних систем ЧПК та гнучких автоматизованих ліній

Фізичним інструментом реалізації цифрових ідей є верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) та промислові роботи.

2.1. Кінематика та приводи верстатів із ЧПК

Верстат із ЧПК (CNC — Computer Numerical Control) позбавлений традиційних маховиків для ручного обертання та жорстких кінематичних ланцюгів між шпинделем і супортом.

- **Сервоприводи та ШКП:** Рух по кожній координаті (X, Y, Z, та обертові осі A, B, C) здійснюється незалежними високоточними сервомоторами. Обертання мотора перетворюється на прямолінійне переміщення порталу за допомогою **кульово-гвинтової передачі (КГП)**. На відміну від звичайної різьби, у КГП між гвинтом і гайкою перекочуються сталеві кульки. Це ліквідує тертя ковзання, забезпечуючи нульовий люфт (беззазорність) і точність позиціонування до мікронів.
- **Багатоосьова обробка (5-осьові верстати):** Впровадження багатоосьових верстатів здійснило революцію в аерокосмічній галузі та машинобудуванні (наприклад, на КБ «Антонов» чи заводі «Мотор Січ»). Вони дозволяють обробляти складні просторові поверхні (наприклад, лопатки газових турбін або крильчатки моноколес) з одного встановлення. Фреза може підходити до заготовки під будь-яким просторовим кутом, що кардинально зменшує кількість перевстановлень деталі та підвищує точність взаємного розташування поверхонь.

2.2. Гнучкі автоматизовані виробничі лінії (FMS) Впровадження гнучких автоматизованих виробничих ліній на машинобудівних підприємствах мінімізує втручання людини у небезпечні та монотонні процеси.

- Комплекс FMS (Flexible Manufacturing System) об'єднує кілька верстатів із ЧПК, автоматизовані склади заготовок, системи автоматичної зміни палет та інструментів.
- **Робототехніка:** Логістику між верстатами забезпечують промислові роботи-маніпулятори (з 6 ступенями вільності) та автоматично керовані візки (AGV). Робот самостійно бере необроблену заготовку зі складу, встановлює її в патрон верстата, знімає готову деталь після обробки та передає її на станцію лазерного 3D-контролю якості (CMM). Це дозволяє реалізувати концепцію "Lights-out manufacturing" — виробництво у темряві, де лінія може працювати цілодобово без присутності персоналу.

Розділ 3. CAD/CAM/CAE системи: оптимізація механічних процесів і зниження ресурсомісткості

Залізо верстатів є безпорадним без цифрового мозку. Застосування сучасних комп'ютерних методів проєктування та моделювання (CAD/CAM/CAE системи) докорінно змінило життєвий цикл виробу: від ідеї до утилізації. Сучасний інженер спочатку створює **Цифровий двійник (Digital Twin)** деталі.

3.1. CAD (Computer-Aided Design) — Системи автоматизованого проєктування

Епоха кульманів і паперових креслень завершилася. Сучасне проєктування є виключно тривимірним (3D) і параметричним. Інженер будує не плоскі проєкції, а тверdotільну математичну модель об'єкта. Змінивши один параметр (наприклад, діаметр отвору), система автоматично перебудовує всю модель, оновлює збірні одиниці, розраховує зміну маси та коригує виробничі креслення.

3.2. CAE (Computer-Aided Engineering) — Системи інженерного аналізу До появи CAE-систем міцність перевіряли шляхом створення дорогих фізичних прототипів і їх руйнування на стендах. Сьогодні для оптимізації механічних процесів використовують Метод скінченних елементів (FEA / MCE).

- **Віртуальний краш-тест:** 3D-модель розбивається на мільйони тетраєдрів. Комп'ютер прикладає віртуальні сили (тиск, вібрації, тепло) і показує кольорову епюру напружень.
- **Топологічна оптимізація та зниження ресурсомісткості:** Це найсучасніший метод зменшення маси конструкції. Алгоритм CAE-системи аналізує деталь, визначає ділянки, які не несуть жодного механічного навантаження, і автоматично "видаляє" звідти матеріал. Деталь набуває біонічної (схожої на скелет птаха) форми. Це дозволяє радикально знизити ресурсомісткість (витрати дорогого титану чи авіаційного алюмінію на 30–50%), зберігаючи 100% міцності.

3.3. CAM (Computer-Aided Manufacturing) — Системи підготовки виробництва

Після того як деталь спроєктована (CAD) і перевірена на міцність (CAE), її потрібно виготовити. CAM-система бере цифрову модель і автоматично розраховує оптимальну траєкторію руху фрези або різця (Toolpath).

- Система враховує жорсткість верстата, матеріал заготовки і твердість інструмента. Вона розраховує траєкторію так, щоб різець знімав стружку з постійним кутом обхвату, уникаючи вібрацій і перегріву (трохоїдальне фрезерування).
- Після верифікації (віртуальної симуляції обробки для уникнення зіткнень) CAM-постпроцесор генерує остаточний машинний код (G-code) для конкретного верстата.

Висновок.

Механіка сучасності вийшла далеко за межі класичних залізних шестерень та важелів. Сьогодні це високоінтелектуальна галузь, що поєднує матеріалознавство, програмування та кібернетику. Перехід машинобудівних підприємств України до концепції Індустрії 4.0, масове впровадження гнучких автоматизованих ліній та систем ЧПК гарантують не лише мікронну точність виробів, але й абсолютну конкурентоздатність продукції на світовому ринку.

Застосування CAD/CAM/CAE систем дозволяє українським інженерам розв'язувати найскладніше завдання сьогодення: забезпечувати максимальну надійність конструкцій при їх радикальному полегшенні та зниженні ресурсомісткості. Це є фундаментальною умовою як для зміцнення обороноздатності держави шляхом випуску сучасної техніки, так і для побудови екологічно відповідальної, високотехнологічної економіки в період післявоєнного відновлення. Сучасний інженер-механік — це не просто виконавець креслень, а архітектор складних цифрових процесів, який несе етичну та професійну відповідальність за безпеку та ефективність створеного ним технологічного майбутнього.

ЛЕКЦІЯ 15. ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ: ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІКИ ДЛЯ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ПОШКОДЖЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація: Лекція розкриває комплексні інженерні підходи до ліквідації наслідків руйнувань в екстремальних умовах. Аналізуються сучасні виклики цивільної та промислової інженерії в умовах воєнного часу. Детально розглядаються методи дефектоскопії (неруйнівного контролю) та розрахунку залишкового ресурсу і міцності пошкоджених будівельних металоконструкцій та машинобудівного обладнання. Окреслюється стратегічна роль інженера-механіка у проєктуванні захисних споруд, здійсненні повоєнної відбудови інфраструктури та реставрації військової й промислової техніки.

Вступ. Зміна парадигми інженерного проєктування

В умовах мирного часу головним завданням прикладної механіки є проєктування нових, економічно ефективних машин і конструкцій із заздалегідь розрахованим запасом міцності. Однак війна кардинально змінює пріоритети. Інженер стикається з об'єктами, які зазнали надкритичних динамічних, термічних або осколкових навантажень, що не були передбачені жодними державними будівельними нормами (ДБН) чи стандартами.

Відновлення пошкодженої інфраструктури — це надскладна нестандартна задача, яка вимагає глибокого розуміння механіки руйнування, теорії пружності та пластичності. Фахівець повинен вміти зчитувати "історію навантаження" понівеченого металу, оцінювати приховані внутрішні дефекти та оперативно ухвалювати етично і технічно обґрунтовані рішення щодо можливості подальшої безпечної експлуатації об'єкта.

Розділ 1. Сучасні виклики цивільної та промислової інженерії в умовах воєнного часу

Бойові дії створюють унікальні стресові умови для об'єктів критичної інфраструктури (мостів, естакад, каркасів промислових цехів, енергетичного обладнання). Інженер-механік має справу зі специфічними видами руйнівних впливів.

1.1. Фізика вибухової хвилі (Бризантна дія)

Вибух генерує ударну хвилю з колосальним надлишковим тиском, яка поширюється зі швидкістю понад 1000 м/с.

- **Динамічний удар:** Конструкція зазнає миттєвого імпульсного навантаження. Звичайні сталеві двотаври чи ферми, які успішно витримували сотні тонн статичної ваги, від бокового динамічного удару миттєво втрачають стійкість (buckling), згинаються або відриваються у вузлах зварних з'єднань.

- **Осколкове ураження:** Фрагменти боєприпасів, що летять із гіперзвуковою швидкістю, створюють у несучих профілях пробоїни. З точки зору опору матеріалів, ці пробоїни є катастрофічними **концентраторами напружень**. Вони різко зменшують площу живого (робочого) перерізу деталі та стають осередками миттєвого поширення втомних тріщин.

1.2. Високотемпературна деградація металів

Пожежі на промислових об'єктах після обстрілів створюють теплове навантаження, що перевищує 800-1000°C.

- **Зниження границі текучості:** При нагріванні понад 500°C конструкційна сталь втрачає до 50% своєї несучої здатності. Балки починають провисати під власною вагою, виникають незворотні пластичні деформації.
- **Фазові перетворення:** Швидке нагрівання і подальше охолодження (водою з пожежних гідрантів) призводить до неконтрольованого загартування або відпуску металу. Зварні шви можуть стати крихкими, що виключає їх подальшу безпечну експлуатацію без глибокого інструментального контролю.

Розділ 2. Методи дефектоскопії, оцінки залишкового ресурсу та міцності будівельних металоконструкцій і машинобудівного обладнання

Для прийняття рішення про відновлення або знесення об'єкта, інженер повинен зазирнути всередину металу. З цією метою застосовують методи Неруйнівного Контролю (NDT — Non-Destructive Testing) або дефектоскопії.

2.1. Ультразвукова дефектоскопія (УЗД)

Це основний метод пошуку прихованих внутрішніх дефектів (тріщин, розшарувань металу, пор у зварних швах).

- **Фізичний принцип:** П'єзоелектричний перетворювач (щуп) випромінює у метал високочастотні акустичні хвилі (від 1 до 10 МГц). Якщо метал цілісний, хвиля доходить до протилежної стінки і відбивається. Якщо на шляху хвилі є тріщина чи пустота (деревина, шлак), хвиля відбивається від цієї перешкоди. Аналізуючи час повернення відбитого імпульсу на екрані осцилографа, інженер з точністю до міліметра визначає глибину та розмір дефекту.

2.2. Магнітопорошковий і капілярний методи

Використовуються для виявлення поверхневих та підповерхневих мікротріщин, які неможливо побачити неозброєним оком.

- На пошкоджену деталь (наприклад, вал газової турбіни після вибуху поруч) накладають сильне магнітне поле і посипають феромагнітним порошком. Лінії магнітного поля викривляються над тріщиною, і порошок чітко осідає по контуру дефекту, формуючи яскравий індикаторний малюнок.

2.3. Розрахунок залишкового ресурсу (МСЕ)

Після інструментальної фіксації всіх дефектів та деформацій починається етап комп'ютерного моделювання.

- Інженер створює 3D-модель пошкодженого об'єкта (Digital Twin) у системах автоматизованого інженерного аналізу (CAE). В модель вносяться всі пробоїни, зменшення товщини стінок та деформації.
- Застосовуючи **Метод скінчених елементів (МСЕ)**, фахівець симулює експлуатаційні навантаження і розраховує новий коефіцієнт запасу міцності. Якщо розрахункові напруження (σ) перевищують допустимі, розробляється план підсилення конструкції (наварювання додаткових накладок (косинок), встановлення бандажів або дублювальних опор).

Розділ 3. Роль інженера-механіка у проєктуванні захисних споруд, повосінній відбудові та реставрації техніки

Сьогодні інженер-механік — це не лише проєктувальник цивільних систем, а й ключовий гарант безпеки оборонної інфраструктури.

3.1. Проєктування пасивних захисних споруд

Будівництво захисних укриттів, протидронових сіток та захисних екранів для підстанцій базується на законах збереження імпульсу та енергії.

- **Енергопоглинаючі конструкції:** Завдання захисного екрана (наприклад, системи габіонів або багатошарових металевих решіток) — не просто "відбити" снаряд, а поглинути його кінетичну енергію ($E_k = \frac{1}{2}mv^2$) за рахунок власної контрольованої пластичної деформації. Інженери розраховують конструкції так, щоб зовнішній шар руйнувався (сминався), гасячи вибухову хвилю і швидкість уламків, зберігаючи при цьому неушкодженим основне обладнання, що знаходиться за екраном.

3.2. Реставрація військової техніки та польовий ремонт В умовах бойових дій виникає критична потреба у швидкому відновленні пошкоджених корпусів бронемашин прямо поблизу лінії фронту.

- **Специфіка зварювання броньових сталей:** Броня має високий вміст вуглецю та легуючих елементів. Її зварювання в польових умовах є величезним інженерним викликом. Швидке охолодження зварного шва призводить до утворення крихких мартенситних структур та так званих "холодних тріщин". Інженер-механік повинен чітко регламентувати технологію ремонту: попередній підігрів металу, використання спеціальних аустенітних електродів та контрольоване повільне охолодження, щоб бронемашина могла безпечно повернутися у стрій і захистити екіпаж.

3.3. Моральна відповідальність та етика повоєнної відбудови

Повоєнна відбудова не означає сліпого відновлення старих зруйнованих об'єктів. Сучасний фахівець має впроваджувати принцип "Build Back Better" (Відбудувати краще, ніж було).

- Це означає використання стійких матеріалів, проєктування споруд подвійного призначення (наприклад, підземні паркінги, що розраховані як бомбосховища) та дотримання найвищих етичних стандартів. Відповідальність інженера-механіка за надійність експлуатації машинних систем та відновлених конструкцій є абсолютною, адже помилка в розрахунку залишкового ресурсу під час відбудови мосту чи заводу може коштувати людських життів.

Висновки

Сучасні виклики цивільної та промислової інженерії в умовах війни вимагають від спеціаліста найвищого рівня кваліфікації. Відновлення інфраструктури, оцінка залишкової міцності пошкоджених вибухами чи вогнем металоконструкцій за допомогою дефектоскопії та методів комп'ютерного моделювання (МСЕ) перетворюють інженера на "лікаря" для сталі та бетону. Роль інженера-механіка у проєктуванні захисних укриттів, реставрації військової техніки та повоєнній відбудові є стратегічно важливою для виживання та подальшого розвитку держави. Знання фундаментальних законів опору матеріалів та інженерна етика стають тією бронею, яка дозволяє гарантувати безпеку суспільства під час ліквідації наслідків техногенних та військових руйнувань.

ЛЕКЦІЯ 16. ЕТИКА ТЕХНІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ. МОРАЛЬНА ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ ІНЖЕНЕРА-МЕХАНІКА ЗА БЕЗПЕКУ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАШИНИХ СИСТЕМ

Анотація: Фінальна лекція курсу переводить фокус із суто технічних розрахунків у площину філософії техніки та професійної моралі. Здійснюється глибокий аналіз техногенних катастроф через призму порушень норм проєктування, виготовлення та експлуатації машин і механізмів. Обґрунтовується необхідність формування професійного кодексу честі інженера-механіка як базового запобіжника від фатальних помилок. Детально розглядається морально-правова та соціальна відповідальність фахівця за прийняття технічних рішень, а також його ключова роль у забезпеченні безпеки праці та життєдіяльності в суспільстві.

Вступ. Ціна інженерної помилки та імператив безпеки

Прикладна механіка оперує колосальними енергіями, масами та швидкостями. Кожна формула, кожен розрахований коефіцієнт запасу міцності та кожен зварний шов мають пряму проєкцію на людське життя. Історія техніки написана не лише геніальними винаходами, але й трагічними катастрофами. Коли міст обвалюється під вагою потяга, коли розривається магістральний газопровід або падає літак — у переважній більшості випадків першопричиною є не "непереборна сила природи", а людський фактор: компроміс із совістю, нехтування стандартами або технічна недбалість.

Етика технічної діяльності вивчає моральні дилеми, з якими стикається фахівець під час проєктування та експлуатації машинних систем. Сучасний інженер-механік постійно перебуває під тиском економічних (здешевити проєкт) та адміністративних (здати об'єкт швидше) факторів. Здатність протистояти цьому тиску, спираючись на закони фізики та професійний кодекс честі, є ознакою справжньої інженерної зрілості та громадянської відповідальності.

Розділ 1. Аналіз техногенних катастроф через призму порушень норм проєктування, виготовлення та експлуатації

Будь-яка техногенна катастрофа — це збій у складній системі взаємодій "людина-машина-середовище". Аналіз таких подій виявляє три критичні етапи, на яких порушення норм призводять до трагедій.

1.1. Помилки на етапі проєктування (Design Flaws)

Проектувальник закладає "генетичний код" механізму. Найстрашніші катастрофи відбуваються тоді, коли інженер не враховує складний напружений стан або динамічну природу навантажень.

- **Ігнорування втоми матеріалів:** Як свідчить історичний досвід залізничного будівництва (Кейс №3), розрахунок лише на статичну міцність є хибним для рухомих систем. Недоліки в проєктуванні (наприклад, залишення гострих внутрішніх кутів, що є концентраторами напружень) призводять до утворення втомних тріщин під дією циклічних динамічних навантажень.
- **Заниження коефіцієнтів запасу міцності:** Прагнення зекономити метал змушує проєктувальників зменшувати площу перерізу деталей. Якщо при цьому не враховуються непередбачувані пікові навантаження (вітер, резонанс, удар), конструкція втрачає стійкість. Сучасний етичний стандарт вимагає застосування ймовірнісних методів розрахунку надійності, де безпека людей завжди переважає над економічною вигодою.

1.2. Порушення на етапі виготовлення (Manufacturing Defects)

Ідеальний проєкт може бути знищений неякісним виконанням.

- **"Штурмівщина" та ігнорування технологічних регламентів:** Яскравим прикладом є індустріалізація в умовах тоталітарного режиму (Кейс №8). Адміністративний тиск і вимога здати об'єкт (новий цех чи завод) "до державного свята" змушували виконавців порушувати технологію зварювання несучих балок кранових естакад (відсутність підігріву, вологі електроди, швидке охолодження). Це призводило до утворення холодних тріщин та подальшого обвалення конструкцій.
- **Фальсифікація даних дефектоскопії:** Коли фахівець з неруйнівного контролю "не помічає" мікротріщини в зоні термічного впливу зварного стику транзитного газопроводу (Кейс №5), щоб підрядник уникнув штрафів за зрив термінів, він вчиняє професійний злочин. Закони фізики поширення тріщин під високим тиском неминуче призведуть до розриву труби та масштабної екологічної або людської трагедії.

1.3. Порушення умов експлуатації машин і механізмів

Машина має експлуатуватися виключно в межах паспортних характеристик. Спроби перевищити вантажопідйомність крана, відключення систем автоматичного захисту чи несвоєчасна заміна зношених деталей (підшипників, тросів) перетворюють надійний механізм на знаряддя катастрофи. Етика експлуатації вимагає безумовного дотримання графіків планово-попереджувальних ремонтів (ППР).

Розділ 2. Формування професійного кодексу честі інженера-механіка

Усвідомлення ціни помилки привело світову та вітчизняну інженерну спільноту до необхідності створення морального компаса — **Кодексу честі інженера**. Це неформальний, але обов'язковий збір правил, що визначає парадигму мислення технократа.

2.1. Фундаментальні принципи Кодексу честі

1. **Пріоритет життя та безпеки:** Жоден наказ керівництва, жодна економічна вигода не можуть бути виправданням для прийняття технічного рішення, яке ставить під загрозу життя людей або призводить до незворотного руйнування довкілля. Інженер зобов'язаний сказати "Ні" проєкту з критичними порушеннями.

2. **Об'єктивність та наукова чесність:** Фахівець спирається виключно на математичні розрахунки, результати випробувань та закони фізики. Фальсифікація даних (приховування дефектів металу, підробка актів випробувань матеріалів) є найтяжчим порушенням інженерної етики.
3. **Неперервний професійний розвиток:** Технології розвиваються стрімко (Індустрія 4.0, нові композити, автоматизація зварювання). Інженер, який перестає вчитися, стає небезпечним для суспільства. Моральний обов'язок — завжди знати актуальні державні (ДСТУ) та міжнародні стандарти.

2.2. Захист фахівця від адміністративного тиску Етичний кодекс — це не лише обов'язки, але й захист. Сучасні міжнародні стандарти управління охороною праці, такі як **ISO 45001** (на які спирається сучасне законодавство України), надають інженеру легітимне право зупинити експлуатацію механізму або відмовитися від підписання акту приймання, якщо виявлено порушення регламентів безпеки. Кодекс честі створює корпоративну солідарність: інженер знає, що професійна спільнота підтримає його принципову позицію.

Розділ 3. Морально-правова та соціальна відповідальність за прийняття технічних рішень

Діяльність фахівця з прикладної механіки та зварювального виробництва лежить у площині суворой регламентації. Помилка тут карається не лише докорами сумління, але й законом.

3.1. Правова (юридична) відповідальність

Кожен розрахунок на міцність, кожне креслення та акт виконаних зварювальних робіт засвідчується підписом (або цифровим підписом) відповідальної особи — головного інженера проєкту (ГІПа), конструктора або майстра.

- У разі аварії технічна експертиза піднімає всю документацію. Якщо доведено, що аварія сталася через недбалість у розрахунках, використання невідповідних матеріалів або свідоме порушення ДСТУ, фахівець несе **кримінальну відповідальність** (позбавлення волі та заборона займатися професійною діяльністю). Це юридичне закріплення морального імперативу безпеки.

3.2. Соціальна відповідальність та життєдіяльність суспільства

Машинобудування та прикладна механіка формують штучне середовище (техносферу), в якому живе суспільство.

- Інженер несе відповідальність перед суспільством за **надійність систем життєзабезпечення**. Від міцності зварних швів на енергоблоці теплоелектростанції, від безвідмовності насосів міського водоканалу та від міцності несучих конструкцій мосту залежить нормальне функціонування цілих регіонів.
- **Екологічний імператив:** Відповідальність виходить за межі захисту людського життя і поширюється на біосферу. Проєктування машин повинно враховувати мінімізацію шкідливих викидів, запобігання витоку мастил та хімікатів (надійність герметизації і сальникових вузлів) і легкість подальшої екологічної утилізації виробу після вичерпання його ресурсу.

Висновки. Філософія творця

Курс «Історія та культура України» через призму прикладної механіки добігає кінця. Ми пройшли шлях від примітивних дерев'яних клинів та важелів античності, через водяні колеса та парові машини індустріалізації, до складних систем ЧПК, робототехніки та аерокосмічних апаратів сучасності. Увесь цей колосальний еволюційний шлях доводить одне: технології самі по собі є нейтральними. Лише людина наділяє їх сенсом.

Для вас, як майбутніх фахівців зі спеціальності «Прикладна механіка», засвоєння етики технічної діяльності є вінцем освіти. Морально-правова та соціальна відповідальність за якість зварних з'єднань, міцність металоконструкцій та безпеку експлуатації механізмів — це не абстрактні поняття. Це ваш щоденний професійний обов'язок.

Формування власного кодексу честі, нетерпимість до компромісів у питаннях надійності та розуміння своєї ролі у забезпеченні життєдіяльності суспільства — саме це перетворює звичайного виконавця креслень на справжнього Інженера. Інженера, який захищає свою державу, створює безпечний простір для життя та своїм інтелектом закладає міцний, надійний фундамент для вільного демократичного майбутнього України.