



Сергій ГОРДІЄНО

серпня 2026 р.

21 лекція, 42 години. П'ять змістових модулів

1. Предмет і методи фізики. Явище, модель, закон, теорія.
2. Фізичні величини. Міжнародна система одиниць СІ.

3. Прямі та непрямі вимірювання. Засоби вимірювання у механічному цеху.

4. Похибки вимірювань. Точність, допуск, значущі цифри.

1. Предмет і методи фізики

Фізика вивчає найзагальніші властивості та закономірності руху матерії. Її метод складається з послідовних кроків: спостереження явища — висунення гіпотези — побудова моделі — експериментальна перевірка — формулювання закону — узагальнення в теорію.

Ключове поняття для інженера — **модель**. Модель свідомо спрощує реальність, залишаючи те, що істотне для конкретної задачі. Різець при розрахунку сил різання можна вважати абсолютно жорстким тілом, хоча він деформується; заготовку при визначенні частоти обертання — ідеальним циліндром, хоча її поверхня має шорсткість. Уміння сказати, чим саме ви знехтували і коли це нехтування перестане бути допустимим, — головна відмінність інженера від виконавця.

Будь-яка фізична теорія має межі застосовності. Класична механіка Ньютона працює бездоганно для швидкостей різання й подач, з якими ви матимете справу, але не описує поведінку електрона в кристалічній ґратці металу.

2. Фізичні величини та СІ

Фізична величина — властивість, яку можна кількісно виміряти. Величини поділяють на скалярні (маса, температура, твердість) і векторні (сила, швидкість, прискорення).

Міжнародна система одиниць СІ побудована на семи основних одиницях; для машинобудування критично важливі метр, кілограм, секунда, ампер і кельвін. Похідні одиниці утворюються з основних: ньютон, паскаль, джоуль, ват.

У цеху паралельно живе позасистемна практика: діаметри в міліметрах, швидкість різання в метрах за хвилину, подача в міліметрах на оберт, частота обертання в обертах за хвилину, тиск у барах чи атмосферах, потужність іноді в кінських силах. Це не помилка, а галузева традиція, зафіксована в паспортах верстатів і довідниках режимів різання. Але **перед підстановкою у фізичну формулу всі величини переводять у СІ**, інакше результат не має сенсу. Найчастіша помилка першокурсника — підставити діаметр у міліметрах у формулу для швидкості різання й отримати число в тисячу разів більше.

3. Вимірювання

Пряме вимірювання — порівняння величини з мірою безпосередньо: діаметр вала штангенциркулем, товщина пластини мікрометром, довжина деталі лінійкою.

Непряме вимірювання — обчислення величини за результатами прямих вимірювань інших величин: об'єм заготовки за її розмірами, швидкість різання за діаметром і частотою обертання, потужність різання за силою та швидкістю.

Основні засоби вимірювання механічного цеху й ціна їх поділки: штангенциркуль — 0,1 або 0,05 мм; мікрометр — 0,01 мм; індикатор годинникового типу — 0,01 мм; важільна скоба — 0,002 мм; кінцеві міри довжини — еталони, за якими налаштовують решту.

4. Похибки, точність і допуск

Жодне вимірювання не дає істинного значення. Розрізняють:

— **абсолютну похибку** Δa — відхилення результату від істинного значення, в одиницях вимірюваної величини;

— **відносну похибку** $\delta = \Delta a/a$ — та сама похибка у частках або відсотках;

— **систематичну похибку** — сталу за знаком і величиною (незбитий нуль мікрометра, спрацьована губка штангенциркуля). Її можна виявити й усунути повіркою;

— **випадкову похибку** — непередбачувану за знаком, спричинену різним зусиллям притиску, температурою, суб'єктивністю відліку. Її зменшують багаторазовим вимірюванням і усередненням.

Не плутайте похибку вимірювання з **допуском** на розмір. Допуск — це те, що дозволив конструктор; похибка — те, що вносить ваш прилад. Загальне правило метрології: похибка засобу вимірювання має бути приблизно в 3–5 разів меншою за допуск на контрольований розмір. Вимірювати вал із допуском 0,02 мм штангенциркулем із ціною поділки 0,1 мм безглуздо: прилад «не бачить» ні браку, ні годної деталі.

Записуючи результат, залишайте лише значущі цифри. Значення «25,4372 мм», отримане штангенциркулем, — не точність, а самообман: три останні цифри не забезпечені приладом.

Ключові формули

- Абсолютна похибка: $\Delta a = |a - a_0|$
- Відносна похибка: $\delta = \Delta a / a \cdot 100 \%$
- Середнє значення: $a = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) / n$
- Похибка непрямого вимірювання (добуток): $\delta = \delta_1 + \delta_2$
- Співвідношення «похибка — допуск»: $\Delta_{\text{прил}} \approx (1/3 \dots 1/5) \cdot T$

Питання для самоконтролю

1. Чому діаметр заготовки перед підстановкою у формулу швидкості різання переводять у метри?
2. Деталь має розмір $\varnothing 40h7$ (допуск 0,025 мм). Яким інструментом її слід контролювати і чому?
3. Чим систематична похибка принципово відрізняється від випадкової та як їх усувають?

ЛЕКЦІЯ 2

КІНЕМАТИКА ТА ДИНАМІКА. ЗАКОНИ НЬЮТОНА. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

План лекції

1. Механічний рух. Кінематичні характеристики.
2. Рух по колу. Кутові величини та швидкість різання.
3. Закони Ньютона.
4. Сили в механіці. Тертя в напрямних і передачах верстата.

1. Кінематика поступального руху

Механічний рух — зміна положення тіла в просторі з часом відносно обраної системи відліку. Основні характеристики: переміщення, швидкість, прискорення.

Будь-яка операція механічної обробки складається з двох рухів: **головного руху різання** (обертання заготовки на токарному верстаті, обертання фрези або свердла) і **руху подачі** (переміщення супорта чи стола). Перший визначає швидкість зняття стружки, другий — її товщину й продуктивність.

Рівномірний прямолінійний рух відбувається зі сталою швидкістю, рівноприскорений — зі сталим прискоренням. Розгін шпинделя, розгін і гальмування осей верстата з ЧПК — саме рівноприскорений рух. Саме тому в керувальній програмі задають не лише швидкість подачі, а й параметри прискорення: різкий старт на високій подачі спричиняє удар у передачі гвинт—гайка та слід на деталі.

2. Рух по колу і швидкість різання

Головний рух на токарному, свердлильному й фрезерному верстатах — обертальний. Для його опису зручніші кутові величини: кутова швидкість ω , період T , частота обертання n .

Кутова швидкість пов'язана з частотою обертання співвідношенням $\omega = 2\pi n$, де n — оберти за секунду. У паспортах верстатів і в довідниках частоту вказують в обертах за хвилину, тому перед підстановкою її ділять на 60. Пропуск цього кроку дає помилку в шістьдесят разів.

Головна робоча формула механічної обробки — **швидкість різання**:

$$v = \pi D n / 1000,$$

де D — діаметр у міліметрах, n — оберти за хвилину, v — метри за хвилину. Коефіцієнт 1000 узгоджує міліметри з метрами. Ця формула — не що інше, як лінійна швидкість точки на колі, записана в цехових одиницях.

З неї випливає практично важливий наслідок: при сталій частоті обертання швидкість різання пропорційна діаметру. Підрізаючи торець диска від периферії до центра, ви безперервно знижуєте фактичну швидкість різання — на осі вона дорівнює нулю. Саме через це на універсальному верстаті торець виходить нерівномірним за шорсткістю, а верстати з ЧПК мають режим сталої швидкості різання (G96), у якому система керування автоматично підвищує оберти в міру зменшення діаметра.

Доцентрове прискорення точки на колі дорівнює $\omega^2 R$, і йому відповідає відцентрова сила, пропорційна квадрату кутової швидкості. Подвоєння обертів збільшує відцентрову силу від залишкового дисбалансу вчетверо. Звідси — вимоги до балансування патронів, оправок і швидкооберткових фрез, а також обмеження максимальних обертів для кулачкових патронів великого діаметра, вказане в паспорті верстата.

3. Закони Ньютона

Перший закон визначає інерціальні системи відліку: тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки на нього не діють інші тіла. Інертність характеризується масою. Велика маса станини й стола верстата — не архаїзм, а засіб гасити коливання й утримувати геометричну точність.

Другий закон пов'язує прискорення з силою і масою: $F = ma$. Це основне рівняння динаміки. Саме воно пояснює, чому важкий стіл фрезерного верстата не можна розганяти миттєво і чому привод подачі має обмеження за прискоренням.

Третій закон описує рівність дії та протидії. При різанні інструмент діє на заготовку із силою різання, заготовка з такою самою за модулем силою діє на інструмент. Ця сила відштовхує різець від деталі й спричиняє пружні віджимання — джерело похибки обробки, про яке йтиметься в лекції 5.

4. Сили в механіці. Тертя у верстаті

Сила тяжіння діє на всі тіла. Вага — сила, з якою тіло тисне на опору; вона дорівнює силі тяжіння лише у спокої або при рівномірному русі.

Сила пружності виникає при деформації й описується законом Гука (лекція 5).

Сила тертя для верстата двоїста. З одного боку, вона паразитна: перетворює механічну енергію на теплоту, знижує ККД приводу, нагріває напрямні та спричиняє їх спрацювання. З іншого — саме тертя утримує заготовку в кулачках патрона й у лещатах, і саме воно забезпечує роботу фрикційних муфт.

Розрізняють тертя спокою, ковзання і кочення. Тертя кочення значно менше, тому в опорах шпинделя застосовують підшипники кочення, а в приводах подачі верстатів із ЧПК — кульково-гвинтові передачі замість звичайного гвинта з гайкою ковзання. Виграш не лише в ККД: тертя ковзання дає ефект «стик-слип» — ривкове переміщення на малих подачах, коли стіл зривається з місця і знову залипає. На кульковій передачі цього немає, і мала подача відпрацьовується плавно.

Машення замінює сухе тертя в'язким тертям шару масла й зменшує його в рази. Тому централізоване машення напрямних — не сервіс, а умова збереження точності: суха напрямна нагрівається, спрацьовується нерівномірно, і верстат втрачає геометрію безповоротно.

При аналізі руху зв'язаних тіл кожне тіло розглядають окремо, записують для нього другий закон Ньютона і розв'язують систему рівнянь. Алгоритм однаковий і для вантажу на блоці, і для системи «двигун — муфта — шпиндель».

Ключові формули

- Швидкість: $v = s/t$; прискорення: $a = \Delta v/t$
- Кутова швидкість: $\omega = 2\pi n = \pi N/30$, де N — оберти за хвилину
- Швидкість різання: $v = \pi Dn/1000$ (D у мм, n в об/хв, v у м/хв)
- Частота обертання за заданою швидкістю: $n = 1000v/(\pi D)$
- Доцентрове прискорення: $a_c = \omega^2 R = v^2/R$
- Другий закон Ньютона: $F = m \cdot a$
- Сила тертя: $F_{тр} = \mu \cdot N$

Питання для самоконтролю

1. Заготовку Ø80 мм обточують при $n = 500$ об/хв. Яка швидкість різання? Якою вона стане при діаметрі 40 мм і тій самій частоті?
2. Для чого в системі ЧПК передбачено режим сталої швидкості різання G96 і на яких операціях він потрібен?

3. Чому в приводах подачі верстатів з ЧПК застосовують кульково-гвинтову передачу, а не пару «гвинт — гайка ковзання»?

ЛЕКЦІЯ 3

ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ, ККД

План лекції

1. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу. Удар.
2. Робота сили. Потужність різання.
3. Кінетична та потенціальна енергія. Закон збереження енергії.
4. ККД верстата. Ланцюг перетворень енергії.

1. Закон збереження імпульсу

Імпульс тіла дорівнює добутку маси на швидкість. У замкненій системі сумарний імпульс залишається сталим незалежно від характеру взаємодії тіл.

Розрізняють пружний удар, при якому механічна енергія зберігається, і непружний, при якому частина її переходить у внутрішню енергію. Кування, штампування, осадка заклепки, робота відрізного молота — приклади непружної взаємодії, де саме перетворення кінетичної енергії на роботу пластичної деформації і є метою процесу.

Маховик кривошипного преса — пряме технічне застосування: між робочими ходами двигун невеликої потужності поступово розганяє маховик, накопичуючи кінетичну енергію, а під час штампування ця енергія віддається за частки секунди. Потужність у момент удару в десятки разів перевищує потужність двигуна. Так само працює накопичення енергії у молоті.

Ударний характер має і візання фрези в заготовку: кожен зуб входить у метал стрибком. Саме тому фрезерування — процес із періодичним навантаженням, схильний до вібрацій (лекція 18).

2. Робота і потужність

Робота сили дорівнює добутку сили на переміщення в напрямку її дії. Сила, перпендикулярна до переміщення, роботи не виконує.

Потужність — робота за одиницю часу, вимірюється у ватах. Для механічної обробки ключова величина — **потужність різання**:

$$P_{\text{різ}} = F_z \cdot v / 60000,$$

де F_z — головна складова сили різання в ньютонах, v — швидкість різання в м/хв, потужність у кіловатах. Коефіцієнт 60000 узгоджує хвилини з секундами і вати з кіловатами.

Ця формула — головний інструмент перевірки: чи витягне верстат обраний режим. Якщо розрахована потужність різання з урахуванням ККД приводу перевищує потужність головного двигуна, верстат «просяде» за обертами, а при спрацюванні захисту — зупиниться. Перевіряти режим за потужністю треба до того, як пустити інструмент у метал, а не після поломки.

Плутати потужність і енергію не можна. Потужність — це темп, енергія — накопичений результат. Двигун потужністю 7,5 кВт за годину роботи споживає 7,5 кВт·год електроенергії.

3. Енергія та закон її збереження

Кінетична енергія пов'язана з рухом, потенціальна — з положенням тіла в силовому полі або з деформацією. Повна механічна енергія є їх сумою.

Закон збереження і перетворення енергії стверджує: енергія не виникає з нічого і не зникає безслідно, вона лише переходить з однієї форми в іншу. Це універсальний закон без жодного відомого винятку. Будь-який проєкт, що обіцяє отримати корисної енергії більше, ніж витрачено, суперечить йому і є або помилковим, або шахрайським.

У верстаті ланцюжок перетворень такий: електрична енергія мережі — механічна енергія на валу двигуна — механічна енергія на шпинделі через пасову чи зубчасту передачу — робота пластичної деформації та руйнування металу в зоні різання — теплота. Практично **вся** потужність різання зрештою перетворюється на теплоту (лекція 7). Це не втрата у звичайному розумінні: сама суть процесу різання полягає у витраті енергії на деформування й відокремлення шару металу.

4. Коефіцієнт корисної дії

ККД — відношення корисної енергії або роботи до всієї витраченої. Величина безрозмірна, завжди менша за одиницю.

Ключове правило, яке порушують найчастіше: **ККД послідовно з'єднаних ланок перемножуються**, а не додаються й не усереднюються. Двигун із ККД 0,9, пасова передача 0,96 і коробка швидкостей 0,95 дають разом 0,82.

Звідси впливає стратегія підвищення ефективності: шукати треба найслабшу ланку. Покращення ланки з ККД 0,97 майже нічого не дасть, якщо в ланцюзі є передача з ККД 0,7. Для верстатів це передусім черв'ячні передачі й пари ковзання — саме тому в сучасних приводах подачі від них відмовляються.

Загальний ККД механічної частини універсального токарного верстата зазвичай становить 0,7–0,8. Це означає, що з 10 кВт, спожитих із мережі, до зони різання доходить близько 7,5–8 кВт, а решта йде на нагрівання підшипників, передач і масла.

Ключові формули

- Імпульс: $p = m \cdot v$; закон збереження: $\Sigma p = \text{const}$
- Робота: $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$; потужність: $P = A/t$
- Кінетична енергія: $W_k = m \cdot v^2/2$
- Потенціальна енергія: $W_p = m \cdot g \cdot h$
- Потужність різання: $P_{різ} = F_z \cdot v/60000$ (кВт; F_z у Н, v у м/хв)
- Потужність двигуна: $P_{дв} = P_{різ}/\eta$
- ККД ланцюга: $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$

Питання для самоконтролю

1. При точінні $F_z = 1800$ Н, $v = 120$ м/хв. Яка потужність різання? Чи достатньо двигуна 4 кВт при ККД приводу 0,8?
2. Чому кривошипний прес із двигуном 10 кВт розвиває під час штампування зусилля, недосяжне для двигуна такої потужності при безперервній роботі?
3. Чому загальний ККД приводу завжди нижчий за ККД найгіршої з його ланок?

ЛЕКЦІЯ 4

ТИСК. ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ ТА ГІДРОДИНАМІКИ

План лекції

1. Тиск. Закон Паскаля.
2. Гідростатичний та атмосферний тиск. Абсолютний і надлишковий тиск.
3. Гідропривод верстата: гідроциліндр, насос, розподільник.
4. Потік рідини. Рівняння нерозривності. В'язкість. Подача МОР.

1. Тиск і закон Паскаля

Тиск — відношення сили, що діє перпендикулярно до поверхні, до площі цієї поверхні. Одиниця — паскаль. У гідравліці верстатів користуються мегапаскалями та барами: $1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа} \approx 1 \text{ атм}$.

Закон Паскаля: тиск, створений у рідині або газі, передається однаково в усіх напрямках без змін. Саме він робить можливим весь гідропривод. Насос створює тиск у маслі, і цей тиск однаково діє на поршень кожного гідроциліндра, під'єданого до магістралі, незалежно від того, де цей циліндр розташований і як орієнтований.

Практичний наслідок — **гідравлічний виграш у силі**: $F = p \cdot S$. Циліндр із поршнем діаметром 100 мм (площа близько $78,5 \text{ см}^2$) при тиску 6 МПа розвиває зусилля приблизно 47 кН, тобто близько 4,8 тонни. Саме так працюють затискні пристосування: гідравлічні лещата, гідропатрони, гідравлічні притискачі. Гідравліка дозволяє отримати велике й, головне, **стабільне й повторюване** зусилля затиску, чого ніколи не дає ручний ключ, зусилля на якому залежить від настрою робітника.

2. Види тиску

Гідростатичний тиск стовпа рідини $p = \rho g h$ залежить лише від густини й висоти, а не від форми посудини. У баку гідростанції це визначає мінімальний рівень масла над всмоктувальним патрубком: якщо рівень упаде, насос почне захоплювати повітря.

Атмосферний тиск при нормальних умовах становить близько 101,3 кПа. Розрізняють:

— **абсолютний тиск** — повний тиск у системі;

— **надлишковий (манометричний)** — перевищення над атмосферним; саме його показує манометр гідростанції;

— **вакуумметричний** — нестача до атмосферного.

На цій різниці ґрунтується робота **вакуумних затискних плит**, якими кріплять тонкі пластини й немагнітні деталі на фрезерних верстатах. Вакуумний насос відкачує повітря з-під деталі, і її притискає атмосферний тиск — не більш ніж 0,1 МПа, тобто близько 1 кг на квадратний сантиметр. Звідси пряме обмеження: сила притиску залежить лише від площі контакту, тому вакуумний затиск придатний для чистових проходів із малими силами різання й неприпустимий для чорнового фрезерування.

3. Гідропривод верстата

Типова гідросистема містить: бак з маслом, насос (найчастіше шестеренний або пластинчастий), запобіжний клапан, гідророзподільник, виконавчі гідроциліндри або гідромотори, фільтр і манометр.

Запобіжний клапан задає максимальний тиск у системі. Він не «зайва деталь»: без нього при закритому розподільнику насос за секунди підняв би тиск до руйнування шлангів. Тиск у системі визначається не насосом, а опором навантаження — насос створює потік, а тиск виникає там, де потоку щось заважає.

Гідропривод має важливу перевагу перед механічним: він забезпечує плавне безступінчасте регулювання швидкості й легко захищається від перевантаження. Тому його застосовують у приводах подачі протяжних і шліфувальних верстатів, у механізмах затиску, у копіювальних супортах.

Пневмопривод (лекція 6) відрізняється принципово: повітря стискається, тому пневмоциліндр не забезпечує ні великого зусилля, ні жорсткої фіксації положення.

4. Потік рідини й подача МОР

Для стаціонарного потоку справджується **рівняння нерозривності**: об'ємна витрата стала вздовж потоку, $Q = S \cdot v = \text{const}$. Звуження перерізу вдвічі подвоює швидкість.

Саме на цьому засноване подавання мастильно-охолоджувальної рідини через вузьке сопло: насос дає помірну витрату, а мале сопло перетворює її на швидкий струмінь, здатний проникнути в зону різання й вимити стружку. У системі подавання МОР через канал в інструменті (внутрішнє підведення) тиск підвищують до 20–70 бар саме для того, щоб струмінь пробився під стружку на глибині свердління.

В'язкість — внутрішнє тертя в рідині. Вона різко залежить від температури: нагріте масло стає рідшим. Для гідросистеми це має прямий наслідок — «холодний» верстат вранці працює інакше, ніж прогрітий: швидкість подачі та зусилля затиску відрізняються, доки масло не набуде робочої температури. Тому в технологічних вимогах точних верстатів прописують прогрів вхолосту перед початком роботи.

Розрізняють ламінарний (шаруватий) і турбулентний (вихровий) режими течії; критерієм слугує число Рейнольдса. У гідролініях прагнуть ламінарного режиму — він дає менші втрати тиску.

Ключові формули

- Тиск: $p = F/S$; сила на поршні: $F = p \cdot S$
- Гідростатичний тиск: $p = \rho \cdot g \cdot h$
- Абсолютний тиск: $p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{надл}}$
- Рівняння нерозривності: $Q = S \cdot v = \text{const}$
- Об'ємна витрата: $Q = V/t$
- Площа круглого поршня: $S = \pi d^2/4$

Питання для самоконтролю

1. Гідроциліндр із поршнем Ø63 мм працює при тиску 5 МПа. Яке зусилля затиску він розвиває?
2. Чому вакуумна плита не придатна для чорнового фрезерування, хоч би якою великою була деталь?

3. Чому точний верстат перед роботою прогрівують вхолосту, а не починають обробку одразу?

ЛЕКЦІЯ 5

МЕХАНІКА ДЕФОРМІВНОГО ТІЛА. НАПРУЖЕННЯ, ЗАКОН ГУКА, ГРАНИЦЯ МІЦНОСТІ

План лекції

1. Види деформацій. Механічне напруження.
2. Закон Гука. Модуль Юнга. Діаграма розтягу.
3. Жорсткість технологічної системи ВПД.
4. Пластична деформація при різанні. Наклеп.

1. Деформації та напруження

Деформація — зміна форми або розмірів тіла під дією сил. Розрізняють розтяг, стиск, зсув, згин і кручення. Реальна деталь зазвичай зазнає кількох одночасно: вал у центрах працює на згин від сили різання й на кручення від моменту.

Механічне напруження $\sigma = F/S$ — сила, що припадає на одиницю площі перерізу. Вимірюється в паскалях, на практиці — в мегапаскалях. Саме напруження, а не сила, визначає, чи зруйнується деталь: сила 10 кН нешкідлива для вала Ø50 мм і руйнівна для дроту Ø2 мм.

Відносна деформація $\varepsilon = \Delta l/l$ — безрозмірна величина, яка показує, на яку частку початкової довжини змінився розмір.

2. Закон Гука та діаграма розтягу

У межах пружності напруження пропорційне відносній деформації: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, де E — **модуль Юнга** (модуль пружності), характеристика матеріалу. Для сталі $E \approx 2 \cdot 10^{11}$ Па, для чавуну приблизно вдвічі менший, для алюмінієвих сплавів — близько $0,7 \cdot 10^{11}$ Па.

Важливий для технолога висновок: модуль Юнга **не залежить від термічної обробки**. Загартована сталь значно твердіша й міцніша за відпалену, але прогинається під тією самою силою так само. Жорсткість деталі визначається матеріалом і геометрією перерізу, а не твердістю. Діаграма розтягу має характерні точки: границя пропорційності, границя пружності, границя текучості σ_t (з неї починається залишкова деформація), границя міцності σ_b (максимальне напруження перед руйнуванням). У розрахунках вводять запас міцності: допустиме напруження беруть у 1,5–3 рази меншим за σ_t .

Для обробки різанням критичною є границя текучості: зняття стружки — це і є примусове перевищення границі текучості в тонкому шарі металу перед різальною кромкою.

3. Жорсткість системи ВПД

Технологічна система «верстат — пристосування — інструмент — деталь» (ВПД) під дією сили різання пружно деформується. Це не аварія, а нормальний стан, який треба враховувати.

Жорсткість системи $j = Fy/y$ — відношення сили до спричиненого нею переміщення, вимірюється в Н/мм. Чим вона вища, тим менше інструмент відтискається від деталі. Величина, обернена жорсткості, — податливість; **податливості ланок додаються**, тому загальна жорсткість системи завжди нижча за жорсткість найслабшої ланки.

Практичні наслідки цього — щоденні:

— **Конусоподібність при точінні довгого вала.** Біля патрона жорсткість висока, у середині прольоту — мінімальна. Різець відтискається сильніше посередині, і вал виходить «бочкою». Рятує задній центр, а при великій довжині — люнет.

— **Відтискання нежорсткого інструмента.** Довгий виліт розточувальної оправки або кінцевої фрези різко знижує жорсткість: прогин пропорційний кубу вильоту. Збільшення вильоту вдвічі збільшує прогин у вісім разів. Звідси головне правило — виліт інструмента робити мінімально можливим.

— **«Виправлення» похибки чистовим проходом.** Оскільки при малій глибині різання сила мала, мале й віджимання, тому останній прохід знімає те, що не зняли попередні. Саме тому чорновий і чистовий проходи розділяють.

— Тонкостінна втулка, затиснута в трипелюстковому патроні, деформується в затиску і після звільнення набуває тригранної форми, хоча розточена була ідеально круглою. Розв'язок — розрізні втулки або спеціальні кулачки, що розподіляють зусилля.

4. Пластична деформація при різанні. Наклеп

Процес різання — це послідовне доведення металу перед кромкою до руйнування через пластичну деформацію. Стружка сходить пластично деформованою й тому завжди коротшою та товщою за зрізаний шар — це явище називають усадкою стружки.

Поверхневий шар обробленої деталі теж зазнає пластичної деформації й **наклепується**: його твердість зростає, а пластичність падає. Наклеп має два боки. Корисний — підвищує зносостійкість і опір втомі, тому його навмисно створюють обкочуванням роликком чи дробоструминним зміцненням. Шкідливий — наклепаний шар важче обробляти наступним інструментом, а при сильному наклепі в ньому виникають розтягувальні залишкові напруження, що знижують втомну міцність і можуть викликати викривлення тонкої деталі після зняття із затиску.

Ключові формули

- Напруження: $\sigma = F/S$
- Відносна деформація: $\varepsilon = \Delta l/l$
- Закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, або $\Delta l = F \cdot l / (E \cdot S)$
- Жорсткість: $j = F_y/y$; податливість: $w = 1/j$
- Податливість системи: $w_{\text{сист}} = w_1 + w_2 + w_3 + w_4$
- Запас міцності: $n = \sigma_t / \sigma_{\text{доп}}$

Питання для самоконтролю

1. Чому довгий вал, обточений у патроні без заднього центра, виходить конічним, і які два способи це усунути?
2. Виліт розточувальної оправки збільшили з 40 до 80 мм. У скільки разів зросте її прогин під тією самою силою?
3. Загартована й відпалена деталі з тієї самої сталі мають різну твердість. Чи відрізнятиметься їх пружний прогин під однаковим навантаженням? Відповідь обґрунтуйте. **МОДУЛЬ II.**

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

7 лекцій, 14 годин

ЛЕКЦІЯ 6

ОСНОВИ МКТ. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ГАЗОВІ ЗАКОНИ. РІВНЯННЯ СТАНУ

План лекції

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Ідеальний газ. Основне рівняння МКТ. Температура.
3. Ізопроцеси та газові закони. Рівняння Клапейрона—Менделєєва.
4. Пневмосистема механічного цеху.

1. Положення МКТ

Молекулярно-кінетична теорія спирається на три положення: речовина складається з частинок; частинки перебувають у безперервному хаотичному русі; між ними діють сили взаємодії. Дослідні підтвердження — броунівський рух, дифузія, здатність газів необмежено розширюватися.

Кількість речовини вимірюють у молях; в одному молі міститься $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ частинок (стала Авогадро). Молярна маса пов'язує масу речовини з кількістю молів: $\nu = m/M$.

2. Ідеальний газ і температура

Ідеальний газ — модель, у якій нехтують розмірами молекул і силами притягання між ними, залишаючи лише пружні зіткнення. Для стисненого повітря цехової пневмомережі при звичайних тисках ця модель працює з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

Основне рівняння МКТ пов'язує тиск газу із середньою кінетичною енергією молекул: тиск — це результат ударів молекул об стінку. Температура за абсолютною шкалою є мірою середньої кінетичної енергії поступального руху молекул.

Абсолютна шкала Кельвіна починається від абсолютного нуля: $T = t + 273$. У всі газові формули підставляють **тільки кельвіни** — підстановка градусів Цельсія є найчастішою помилкою в задачах цього розділу.

3. Ізопроцеси та рівняння стану

Ізотермічний процес ($T = \text{const}$): $p \cdot V = \text{const}$ — закон Бойля—Маріотта.

Ізобарний ($p = \text{const}$): $V/T = \text{const}$ — закон Гей-Люссака.

Ізохорний ($V = \text{const}$): $p/T = \text{const}$ — закон Шарля.

Об'єднаний газовий закон: $pV/T = \text{const}$. Рівняння стану ідеального газу (Клапейрона—Менделєєва): $pV = (m/M)RT$, де $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

4. Пневмосистема цеху

Стиснене повітря — другий після електрики енергоносіє механічного цеху. Його застосовують у пневмоциліндрах затискних пристосувань, пневмопатронах, системах обдування зони різання й конусів шпинделя, пневматичних відсічках та розподільниках, пневмоприводах дверей огорож верстатів з ЧПК.

Компресор стискає повітря приблизно до 0,6–0,8 МПа (6–8 бар) — це стандартний тиск цехової мережі. При стисканні газ нагрівається, тому компресор має охолоджувач, а на виході — вологовідокремлювач: охолоджуючись, стиснене повітря виділяє конденсат (лекція 10). Волога в пневмережі — причина корозії циліндрів і замерзання апаратури взимку.

Принципова відмінність пневматики від гідравліки впливає безпосередньо з газових законів: повітря стискається, рідина практично ні. Тому пневмоциліндр «пружинить» — його шток під навантаженням просідає, а положення не фіксується жорстко. Звідси правило: пневматику застосовують там, де потрібна швидкість і простота (обдування, швидкий затиск легких деталей, подача пруткового матеріалу), а гідравліку — там, де потрібні велике зусилля й жорстка фіксація. Ще один практичний наслідок: зусилля пневмоциліндра прямо пропорційне тиску мережі. Падіння тиску з 6 до 4 бар знижує зусилля затиску на третину. Тому в пневмосистемах верстатів ставлять реле тиску, яке блокує пуск шпинделя при недостатньому тиску: деталь, затиснута слабо, вилітає з патрона.

Ключові формули

– Кількість речовини: $\nu = m/M = N/N_A$

– Абсолютна температура: $T = t + 273$

– Закон Бойля—Маріотта: $p_1 V_1 = p_2 V_2$

– Закон Гей-Люссака: $V_1/T_1 = V_2/T_2$

– Закон Шарля: $p_1/T_1 = p_2/T_2$

– Об'єднаний закон: $p_1 V_1/T_1 = p_2 V_2/T_2$

– Рівняння стану: $pV = (m/M) \cdot R \cdot T$

– Зусилля пневмоциліндра: $F = p \cdot S$ (з урахуванням ККД 0,85–0,9)

Питання для самоконтролю

1. Пневмоциліндр Ø80 мм працює від мережі 6 бар. Яке зусилля він розвиває? Як воно зміниться при падінні тиску до 4 бар?
2. Чому для точного затиску тонкостінної деталі на токарному верстаті обирають гідропатрон, а не пневмопатрон?
3. Звідки в цеховій пневмережі береться вода, якщо в компресор подається сухе на вигляд повітря?

ЛЕКЦІЯ 7

ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОЄМНІСТЬ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

План лекції

1. Внутрішня енергія та способи її зміни.
2. Кількість теплоти. Питома теплоємність. Рівняння теплового балансу.
3. Перший закон термодинаміки. Застосування до ізопроцесів.
4. Тепловий баланс процесу різання.

1. Внутрішня енергія

Внутрішня енергія тіла — сумарна енергія хаотичного руху та взаємодії його частинок. Змінити її можна двома способами: теплопередачею і виконанням роботи. Для механічного цеху це не абстракція: нагрівання деталі в зоні різання відбувається саме другим способом — через роботу пластичної деформації.

2. Кількість теплоти й тепловий баланс

Кількість теплоти при нагріванні або охолодженні: $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$, де c — питома теплоємність. Для сталі $c \approx 460$ Дж/(кг·К), для чавуну ≈ 500 , для алюмінію ≈ 900 , для міді ≈ 385 Дж/(кг·К).

Порівняння теплоємностей пояснює цехову практику: алюмінієва деталь тієї самої маси вбирає вдвічі більше теплоти на кожен градус, ніж сталевая, але й теплопровідність алюмінію вчетверо вища (лекція 9), тому він швидше вирівнює температуру по об'єму. Сталь навпаки — гріється локально, у зоні різання.

Рівняння теплового балансу для замкненої системи: $Q_{\text{віддане}} = Q_{\text{отримане}}$. На ньому будують усі розрахунки нагрівання деталей, охолодження МОР, підбору ємності бака.

3. Перший закон термодинаміки

Кількість теплоти, надана системі, витрачається на зміну її внутрішньої енергії та на роботу проти зовнішніх сил: $Q = \Delta U + A$.

Застосування до ізопроцесів:

— ізотермічний: $\Delta U = 0$, тож $Q = A$ (уся теплота йде на роботу);

— ізохорний: $A = 0$, тож $Q = \Delta U$ (уся теплота — на нагрівання);

— ізобарний: $Q = \Delta U + p \cdot \Delta V$;

— адіабатний: $Q = 0$, тож $A = -\Delta U$. Газ, розширюючись без теплообміну, охолоджується, а при стисканні нагрівається. Це пояснює нагрівання циліндра компресора та охолодження повітря на виході з пневмосопла.

4. Тепловий баланс різання

Практично вся механічна робота різання перетворюється на теплоту. Джерел три: пластична деформація зрізаного шару (основне, до 70 %), тертя стружки об передню поверхню інструмента, тертя задньої поверхні об оброблену поверхню.

Отриману теплоту розподіляють між чотирма «приймачами». Орієнтовний баланс при точінні сталі:

Куди відводиться теплота	Частка, %
Стружка	50–80
Інструмент (різець)	2–8
Заготовка	10–40
Навколишнє середовище й МОР	1–10

Цей розподіл — ключ до розуміння режимів. Чим вища швидкість різання, тим більша частка теплоти йде зі стружкою: вона просто не встигає передати теплоту заготовці. Тому високошвидкісна обробка (HSM) при правильних режимах залишає деталь **холоднішою**, ніж повільне різання, — суперечить інтуїції, але підтверджується вимірюванням.

Частка теплоти, що дістається різцю, невелика за абсолютною величиною, але саме вона визначає його стійкість: маса робочої частини мізерна, тому навіть кілька відсотків потужності різання розігрівають кромку до 800–1000 °С. Саме температура кромки, а не сила різання, є головним обмежувачем швидкості різання (лекція 9).

Ключові формули

— Кількість теплоти: $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$

— Рівняння теплового балансу: $\Sigma Q_{\text{відд}} = \Sigma Q_{\text{отр}}$

— Перший закон термодинаміки: $Q = \Delta U + A$

— Робота газу при $p = \text{const}$: $A = p \cdot \Delta V$

— Теплота, що виділяється при різанні: $Q \approx P_{\text{різ}} \cdot t$

Питання для самоконтролю

1. Сталева деталь масою 3 кг нагрілася при обробці на 40 °С. Скільки теплоти вона поглинула?
2. Чому при високошвидкісному фрезеруванні деталь нагрівається менше, ніж при повільному, хоча потужність різання більша?
3. Чому різець із мізерною часткою загальної теплоти нагрівається до температур, небезпечних для його матеріалу?

ЛЕКЦІЯ 8

ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ. ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ

План лекції

1. Оборотні та необоротні процеси. Другий закон термодинаміки.
2. Тепловий двигун. Цикл Карно. Максимальний ККД.
3. Холодильна машина і тепловий насос.
4. Охолодження МОР і термостабілізація верстата.

1. Другий закон термодинаміки

Усі реальні процеси необоротні: теплота самочинно переходить лише від гарячого тіла до холодного, механічна енергія повністю перетворюється на теплоту, а зворотне перетворення завжди неповне.

Формулювання Клаузіуса: неможливий процес, єдиним результатом якого є передача теплоти від холоднішого тіла до гарячішого. Формулювання Томсона: неможливо всю теплоту, отриману від нагрівника, перетворити на роботу.

Мірою необоротності є ентропія: у замкненій системі вона не зменшується. Практичний зміст для інженера простий — **енергію не лише не можна створити, її ще й не можна повністю «повернути»**. Теплота, що розсіялася в цеху від різання, працювати вже не буде.

2. Тепловий двигун і цикл Карно

Тепловий двигун працює циклічно між нагрівником і холодильником, перетворюючи на роботу лише частину отриманої теплоти:

$$\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1.$$

Максимально можливий ККД визначається лише температурами і досягається в циклі Карно:

$$\eta_{\max} = (T_1 - T_2)/T_1.$$

Це верхня межа, недосяжна на практиці, але корисна як критерій: вона показує, що жоден «покращувач» не підніме ККД двигуна вище за значення, задане температурами.

3. Холодильна машина і тепловий насос

Якщо цикл провести у зворотному напрямку, витрачаючи роботу, теплоту можна перекачувати від холодного тіла до гарячого. Це не порушує другого закону, бо процес не є єдиним результатом — за нього заплачено роботою компресора.

Ефективність характеризують холодильним коефіцієнтом $\varepsilon = Q_2/A$, який, на відміну від ККД, може бути значно більшим за одиницю. Холодильна машина складається з компресора, конденсатора, дроселя і випарника; робоче тіло — холодоагент, що по чергову випаровується (відбираючи теплоту) і конденсується (віддаючи її).

4. Термостабілізація у верстатобудуванні

Тепловий стан верстата — одна з головних причин похибок точної обробки (лекція 11). Тому сучасні верстати обладнують системами відведення й стабілізації теплоти:

— **Чилер (холодильна машина) для МОР**. При інтенсивній обробці МОР нагрівається, втрачає охолоджувальну здатність і починає сама гріти деталь. Чилер підтримує температуру емульсії на заданому рівні, зазвичай 18–22 °С.

— **Термостабілізація шпинделя**. Через сорочку корпусу шпиндельної бабки прокачують охолоджену рідину, відбираючи теплоту від підшипників. Без цього шпиндель за годину роботи подовжується на десятки мікрометрів.

— **Кондиціонування приміщення**. Для координатно-розточувальних верстатів і вимірювальних лабораторій температуру повітря витримують 20 ± 1 °С — це базова температура метрології (лекція 11).

Зверніть увагу на принципову річ: холодильна машина не «знищує» теплоту, а переносить її з деталі в цех, причому віддає більше, ніж відібрала, на величину роботи компресора. Тому цех із великою кількістю чилерів потребує потужної вентиляції.

Ключові формули

- ККД теплового двигуна: $\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = A/Q_1$
- ККД циклу Карно: $\eta_{\max} = (T_1 - T_2)/T_1$
- Холодильний коефіцієнт: $\varepsilon = Q_2/A$
- Теплота, відведена МОР: $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$

Питання для самоконтролю

1. Чому холодильний коефіцієнт може бути більшим за одиницю, а ККД — ніколи?
2. Для чого шпindelьну бабку прецизійного верстата обладнують контуром термостабілізації?
3. Нагріта до 45 °С емульсія погано охолоджує зону різання. Поясніть це з погляду рівняння теплового балансу.

ЛЕКЦІЯ 9

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА: ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, КОНВЕКЦІЯ, ВИПРОМІНЮВАННЯ

План лекції

1. Три механізми передавання теплоти.
2. Теплопровідність. Закон Фур'є. Теплопровідність матеріалів інструмента.
3. Конвекція. Роль МОР.
4. Температура в зоні різання й стійкість інструмента.

1. Механізми теплопередачі

Теплопровідність — передавання теплоти через речовину без переміщення самої речовини, за рахунок коливань кристалічної ґратки і, у металах, руху вільних електронів. Саме тому метали проводять теплоту в сотні разів краще за неметали.

Конвекція — перенесення теплоти разом із потоком рідини або газу. Буває природна (за рахунок різниці густин нагрітого й холодного шарів) і вимушена (потоком від насоса чи вентилятора).

Теплове випромінювання — передавання енергії електромагнітними хвилями; не потребує середовища (лекція 19).

2. Теплопровідність

Закон Фур'є в спрощеній формі: тепловий потік пропорційний площі, різниці температур і оберненопропорційний товщині шару:

$$Q/t = \lambda \cdot S \cdot \Delta t/d,$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Орієнтовні значення λ , важливі для механічної обробки:

Матеріал	λ , Вт/(м·К)
Мідь	390
Алюміній	210
Твердий сплав (WC–Co)	50–80
Вуглецева сталь	45–50
Швидкорізальна сталь	20–25
Нержавна сталь аустенітна	15–17
Титановий сплав	7–8
Мінералокераміка	3–10

Ця таблиця пояснює половину проблем механічного цеху. Нержавна сталь і титан **погано проводять теплоту**, тому вона не відходить у стружку й заготовку, а концентрується на різальній кромці. Саме через це, а не через твердість, титан вважають важкооброблюваним: за твердістю він не перевершує звичайну сталь, але швидкість різання для нього доводиться знижувати в кілька разів.

З того ж боку — вибір інструментального матеріалу. Кераміка тверда й теплостійка, але майже не проводить теплоту, тому працює з високими швидкостями й погано переносить переривчасте різання з ударним температурним навантаженням.

3. Конвекція та функції МОР

Мастильно-охолоджувальна рідина виконує чотири функції одночасно, і охолодження — лише одна з них:

— **охолоджувальна** — вимушена конвекція відбирає теплоту від інструмента й деталі;

— **мастильна** — зменшує тертя стружки об передню поверхню, а отже, зменшує саме тепловиділення;

— **транспортувальна** — вимиває стружку із зони різання, особливо при свердлінні глибоких отворів;

— **захисна** — запобігає корозії обробленої поверхні й напрямних.

Спосіб подавання визначає ефективність. Поливання «зверху» майже не досягає кромки: шар пари, що утворюється на гарячій поверхні, працює теплоізолятором (ефект Лейденфроста). Тому на відповідальних операціях застосовують подавання під тиском, внутрішнє підведення через канали інструмента або обробку з мінімальним змащуванням (MQL), коли в зону подають аерозоль олії у струмені повітря.

Окремий випадок — **переривчасте різання із СОЖ**. При фрезеруванні зуб фрези почергово гріється в металі та охолоджується в рідині, зазнаючи термоцикування. Для твердосплавної фрези це часто гірше, ніж постійний нагрів: виникають термічні тріщини гребінчастого типу. Тому чорнове фрезерування твердим сплавом нерідко ведуть узагалі без МОР.

4. Температура кромки і стійкість інструмента

Температура в зоні різання досягає 600–900 °С при точінні сталі твердим сплавом. Кожен інструментальний матеріал має межу теплостійкості: швидкорізальна сталь — близько 600 °С, твердий сплав — 800–1000 °С, кераміка й надтверді матеріали — понад 1200 °С. Перевищення межі означає втрату твердості та лавиноподібне спрацювання кромки.

Звідси **залежність стійкості від швидкості різання** (формула Тейлора): $v \cdot T^m = C$. Показник m малий (0,1–0,3), а це означає: збільшення швидкості різання на 20 % може скоротити стійкість інструмента вдвічі. Саме тому вибір режиму — завжди компроміс між продуктивністю та витратою інструмента, і саме тому «додати обертів» не є безкоштовним рішенням.

Ключові формули

– Закон Фур'є: $Q/t = \lambda \cdot S \cdot \Delta t/d$

– Термічний опір шару: $R = d/\lambda$

– Тепловий потік при конвекції: $Q/t = \alpha \cdot S \cdot \Delta t$

– Залежність стійкості: $v \cdot T^m = C$ (формула Тейлора)

Питання для самоконтролю

1. Чому титановий сплав обробляють на швидкостях у 3–5 разів менших, ніж вуглецеву сталь, хоча за твердістю вони близькі?
2. Чому чорнове фрезерування твердосплавною фрезою часто ведуть без подавання МОР?
3. Швидкість різання підвищили на 25 %. Що станеться зі стійкістю інструмента і чому цей ефект такий різкий?

ЛЕКЦІЯ 10

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ. ПЛАВЛЕННЯ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, ПАРООУТВОРЕННЯ

План лекції

1. Агрегатні стани. Плавлення і тверднення.
2. Кристалізація металів і будова відливка.
3. Пароутворення, кипіння, конденсація.
4. Вологість повітря і конденсат у цеху.

1. Плавлення і тверднення

Плавлення відбувається при сталій температурі: уся підведена теплота йде на руйнування кристалічної ґратки, а не на нагрівання. Кількість теплоти: $Q = \lambda_{пл} \cdot m$, де $\lambda_{пл}$ — питома теплота плавлення.

Температури плавлення, важливі для машинобудування: сталь — 1400–1530 °С, чавун — 1150–1250 °С, мідь — 1083 °С, алюміній — 660 °С, олово — 232 °С, припій ПОС-61 — близько 190 °С. Чисті метали плавляться при одній температурі, сплави — в інтервалі, між лінією ліквідус і лінією солідус. Це має пряме технологічне значення: сплав із широким інтервалом кристалізації схильний до утворення усадкових рихлот, а припой з вузьким інтервалом дають чіткий шов.

2. Кристалізація і структура металу

При твердненні метал виділяє приховану теплоту й утворює кристали, що ростуть від центрів кристалізації. Кількість цих центрів визначає розмір зерна: чим швидше охолодження й чим більше центрів, тим дрібніше зерно і тим міцніший та в'язкіший метал. Саме тому у виливницю вводять модифікатори — штучні центри кристалізації.

У відливку структура неоднорідна: біля холодної стінки форми — дрібні зерна («кірка»), далі — стовпчасті кристали, у центрі — велике рівновісне зерно. Цим пояснюється, чому в чавунному корпусі механічно найслабшою є серцевина, а зняття «кірки» першим чорновим проходом різко знижує стійкість інструмента: у литій кірці є формувальний пісок і окалина.

Усадка при твердненні (для сталі 1,5–2 % за об'ємом) є причиною внутрішніх напружень у відливках і поковках. Ці напруження врівноважені, доки деталь ціла; знімаючи метал при обробці, ви порушуєте рівновагу — і деталь «веде» вже після обробки. Саме тому відповідальні корпусні деталі піддають старінню (природному витримуванню або штучному нагріванню) між чорною і чистовою обробками.

3. Пароутворення й кипіння

Випаровування відбувається з поверхні за будь-якої температури, кипіння — по всьому об'єму при температурі, що залежить від тиску. Питома теплота пароутворення для води $r \approx 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг — величина дуже велика, що й робить воду основою охолоджувальних середовищ.

Саме висока теплота пароутворення пояснює ефективність водної емульсії порівняно з олією. Але вона ж породжує вже згаданий ефект парової плівки на розжареній поверхні: пара має мізерну теплопровідність і різко погіршує тепловідведення.

Гартувальні середовища використовують це явище свідомо: охолодження у воді йде швидше, ніж в олії, саме через різну поведінку парової сорочки (лекція 12).

4. Вологість повітря та конденсат

Абсолютна вологість — маса водяної пари в кубометрі повітря; відносна — відношення фактичної абсолютної вологості до максимально можливої за цієї температури, у відсотках.

Точка роси — температура, при якій наявна пара стає насиченою й починає конденсуватися. Це поняття має три практичні застосування в цеху:

— конденсат у пневмомережі (лекція 6): стиснене й нагріте повітря, охолоджуючись у трубопроводі, переходить точку роси, і в апаратуру потрапляє вода;

— «запотівання» холодних деталей, занесених із вулиці взимку: на поверхні конденсується волога й починається корозія, тому деталі перед обробкою й вимірюванням витримують у цеху;

— корозія точного інструмента й кінцевих мір при зберіганні у вологому приміщенні.

Ключові формули

— Теплота плавлення: $Q = \lambda_{пл} \cdot m$

— Теплота пароутворення: $Q = r \cdot m$

— Повна теплота нагрівання з плавленням: $Q = c \cdot m \cdot \Delta t + \lambda_{пл} \cdot m$

— Відносна вологість: $\phi = (\rho/\rho_n) \cdot 100 \%$

Питання для самоконтролю

1. Чому корпусну чавунну деталь піддають старінню між чорною і чистовою обробками?
2. Чому перший чорновий прохід по литій поверхні різко знижує стійкість інструмента?
3. Деталь занесли в цех із морозу й одразу поставили на вимірювальну плиту. Назвіть дві фізичні причини, чому це помилка.

ЛЕКЦІЯ 11

ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ ТІЛ. ТЕПЛОВІ ДЕФОРМАЦІЇ У МЕТАЛООБРОБЦІ

План лекції

1. Лінійне та об'ємне теплове розширення.
2. Теплові деформації верстата й заготовки.
3. Температура 20 °С як основа метрології.
4. З'єднання з натягом: теплове складання.

1. Закономірності теплового розширення

Лінійне розширення: $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$, де α — коефіцієнт лінійного розширення, 1/К. Об'ємне розширення характеризується коефіцієнтом, приблизно втричі більшим за лінійний.

Значення α , які треба знати напам'ять:

Матеріал	$\alpha, \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$
Інвар	1,5
Чавун	10
Вуглецева сталь	11–12
Нержавна сталь аустенітна	17
Латунь	19
Алюмінієві сплави	23–24

2. Теплові деформації у верстаті

Оцінимо порядок величини. Сталевий вал довжиною 500 мм, нагрітий при обробці на 10 °С, подовжується на:

$$\Delta l = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 10 = 0,06 \text{ мм} = 60 \text{ мкм.}$$

Шістдесят мікрометрів — це в кілька разів більше за допуск точної деталі. Тобто **теплова деформація перевищує допуск раніше, ніж це роблять зношення інструмента або похибка верстата**. Звідси низка цехових правил:

- вимірювати деталь одразу після зняття стружки не можна: треба дати їй охолонути, інакше після охолодження розмір виявиться меншим;
- деталь, затиснута в центрах, при нагріванні подовжується і впирається в задній центр; виникає повздовжня сила, що згинає вал і спричиняє нагрівання центра. Тому застосовують обертовий центр і підпружинену пінолю;
- шпиндель верстата за першу годину роботи подовжується на десятки мікрометрів, зміщуючи нульову точку по осі Z; сучасні системи ЧПК мають функцію теплової компенсації, яка вводить поправку за показаннями вбудованих термодатчиків;
- неоднакове нагрівання станини (наприклад, від гарячої стружки, що накопичилася з одного боку) вигинає її та порушує паралельність напрямних.

Окремий випадок — **різні коефіцієнти розширення** з'єднаних деталей. Алюмінієва деталь у сталевому пристосуванні при нагріванні розширюється вдвічі сильніше — затиск, виставлений на холодну, при нагріванні стане надмірним і деформує деталь.

3. Нормальна температура вимірювання

Стандартом встановлено нормальну температуру вимірювання **20 °С**. Усі розміри на кресленні, всі допуски й усі кінцеві міри віднесені саме до неї. Це не формальність: сталеву деталь 200 мм при 25 °С довша на 12 мкм, ніж при 20 °С.

Із цього випливає три практичні правила: точні вимірювання виконують у термостатованому приміщенні; деталь і засіб вимірювання витримують разом до вирівнювання температури; мікрометр не тримають у долоні довше, ніж потрібно — тепло руки помітно змінює його показання при вимірюванні з точністю до мікрометра.

Інвар із мізерним коефіцієнтом розширення застосовують саме там, де ця проблема неприйнятна: в еталонних мірах, у деталях вимірювальних машин.

4. Теплове складання з'єднань із натягом

З'єднання з натягом (посадки H7/r6, H7/s6 та подібні) збирають не запресовуванням, а тепловим способом: охоплювальну деталь нагрівають, вона розширюється, вільно надівається на вал, а при охолодженні обтискає його з розрахунковим зусиллям. Так насаджують зубчасті колеса, бандажі, підшипники.

Необхідна температура нагрівання визначається з умови, щоб теплове розширення перевищило натяг із запасом на зазор при складанні:

$$\Delta t = (N + Sz_6) / (\alpha \cdot d).$$

Альтернатива — охолодження вала в рідкому азоті ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це застосовують, коли нагрівати охоплювальну деталь не можна через ризик відпуску загартованого шару.

Демонтаж підшипників індукційним нагрівачем (лекція 16) — та сама фізика у зворотному напрямку.

Ключові формули

- Лінійне розширення: $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$
- Кінцева довжина: $l = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$
- Об'ємне розширення: $\Delta V = 3\alpha \cdot V \cdot \Delta t$
- Температура нагрівання при тепловому складанні: $\Delta t = (N + Sz_6) / (\alpha \cdot d)$
- Поправка розміру до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$: $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot (t - 20)$

Питання для самоконтролю

1. Сталевий вал 400 мм нагрівся на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. На скільки він подовжився? Порівняйте з допуском 0,03 мм.
2. На яку температуру треба нагріти сталеве зубчасте колесо з отвором $\varnothing 100\text{ мм}$, щоб надіти його на вал із натягом 0,05 мм із зазором при складанні 0,03 мм?
3. Чому нормальною температурою вимірювання прийнято саме $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і що станеться, якщо контролювати деталь при $30\text{ }^{\circ}\text{C}$?

ЛЕКЦІЯ 12

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

План лекції

1. Будова кристалічних тіл. Алотропія заліза.
2. Гартування: швидкість охолодження і критична швидкість.
3. Відпуск, відпал, нормалізація.
4. Хіміко-термічна обробка й поверхневе зміцнення.

1. Кристалічна будова металів

Метали мають кристалічну будову: атоми впорядковані в просторовій ґратці. Для заліза характерні дві ґратки — об'ємноцентрована кубічна (ОЦК) і гранецентрована кубічна (ГЦК). Здатність однієї речовини існувати в різних кристалічних формах називається **алотропією**, і саме вона робить можливою термічну обробку сталі.

Ниже $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ залізо має ґратку ОЦК (α -залізо, ферит), вище — ГЦК (γ -залізо, аустеніт). Принципова різниця в тому, скільки вуглецю здатна розчинити кожна форма: аустеніт — до 2 %, ферит — соті частки відсотка. Розчинність у сотні разів різна — і в цьому вся суть гартування.

Реальний метал містить дефекти ґратки: вакансії, дислокації, межі зерен. Пластична деформація — це рух дислокацій, а зміцнення будь-якого типу (наклеп, легування, гартування) зводиться до створення перешкод цьому рухові.

2. Гартування

Гартування складається з нагрівання сталі вище температури перетворення (зазвичай $780\text{--}860\text{ }^{\circ}\text{C}$ для конструкційних сталей), витримки й **швидкого** охолодження.

Фізика процесу така. При нагріванні вуглець розчиняється в аустеніті. Якщо охолоджувати повільно, вуглець встигає вийти з розчину, утворюючи ферит і цементит — м'яку рівноважну структуру. Якщо ж охолодити швидше за **критичну швидкість**, дифузія не встигає: ґратка перебудовується на ОЦК, а вуглець залишається в ній насильно, спотворюючи її. Утворюється **мартенсит** — пересичений твердий розчин, дуже твердий і крихкий.

Отже, твердість після гартування створює не сам нагрів, а саме недопущення дифузії. Звідси всі практичні наслідки:

— **вибір середовища.** Вода охолоджує різкіше за олію, олія — різкіше за повітря. Вуглецеві сталі гартують у воді, леговані — в олії, високолеговані — на повітрі. Легувальні елементи знижують критичну швидкість, тому й потрібне м'якше середовище;

— **прогартовуваність.** Серцевина великої деталі охолоджується повільніше за поверхню, тому може не загартуватися взагалі. Вуглецева сталь прогартовується на глибину лише кількох міліметрів;

— **гартувальні тріщини й викривлення.** Різкий перепад температур між поверхнею та серцевиною плюс об'ємний ефект мартенситного перетворення створюють величезні внутрішні напруження. Саме тому загартовану деталь ніколи не залишають без відпуску й закладають припуск на шліфування після термообробки.

3. Відпуск, відпал, нормалізація

Відпуск — нагрівання загартованої сталі нижче температури перетворення (150–650 °C) із подальшим охолодженням. Частина вуглецю виходить із пересиченого розчину, напруження знімаються, крихкість падає ціною деякого зниження твердості. Низький відпуск (150–250 °C) застосовують для різального й вимірювального інструмента, високий (500–650 °C) у поєднанні з гартуванням — це поліпшення, стандартна обробка валів і зубчастих коліс.

Відпал — нагрівання й дуже повільне охолодження разом із піччю. Знімає внутрішні напруження, подрібнює зерно, знижує твердість і поліпшує оброблюваність різанням. Відливки й поковки перед механічною обробкою проходять саме відпал.

Нормалізація — те саме, але з охолодженням на спокійному повітрі: структура виходить дрібнішою й міцнішою, ніж після відпалу.

4. Хіміко-термічна обробка і поверхневе зміцнення

Часто потрібна деталь із твердою поверхнею й в'язкою серцевиною — наприклад, зубчасте колесо: зуб має опиратися спрацюванню, а тіло колеса — ударові.

Цементация — насичення поверхневого шару вуглецем при 900–950 °C у твердому або газовому карбюризаторі з наступним гартуванням. Глибина шару 0,5–2 мм. Процес дифузійний, тому час витримки вимірюється годинами.

Азотування — насичення азотом при 500–600 °C. Дає ще вищу твердість і не потребує подальшого гартування, тому деталь майже не викривляється.

Поверхневе гартування з індукційним нагріванням (ТВЧ) — прогрівання тонкого поверхневого шару вихровими струмами за секунди з негайним охолодженням (фізика самого нагрівання — у лекції 16). Серцевина не встигає прогрітися й залишається в'язкою.

Для вас як майбутніх технологів із цього розділу впливає одне наскрізне правило: **термічна обробка змінює розміри деталі.** Гартування супроводжується зміною об'єму й викривленням, тому послідовність операцій завжди така: чорнова обробка — термообробка — чистова обробка (найчастіше шліфування) з припуском, що перекриває деформацію.

Ключові формули

– Швидкість охолодження: $v = \Delta t / \tau$

– Умова гартування: $v_{\text{охол}} > v_{\text{кр}}$

– Теплота нагрівання деталі в печі: $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$

– Орієнтовна глибина шару при дифузії: $h \approx k \cdot \sqrt{\tau}$

Питання для самоконтролю

1. Чому саме алотропія заліза робить можливим гартування сталі, а, скажімо, міді — ні?
2. Чому вуглецеву сталь гартують у воді, а леговану — в олії? Що станеться, якщо поміняти середовища місцями?
3. Чому чистову обробку відповідальної деталі виконують після термообробки, а не до неї?

МОДУЛЬ III. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

5 лекцій, 10 годин

ЛЕКЦІЯ 13

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЗАРЯД, НАПРУЖЕНІСТЬ, ПОТЕНЦІАЛ. ЄМНІСТЬ

План лекції

1. Електричний заряд. Закон Кулона.
2. Електричне поле, напруженість, потенціал.
3. Провідники й діелектрики. Пробій. Ємність.
4. Електроерозійна обробка. Статика у цеху з ЧПК.

1. Заряд і закон Кулона

Електричний заряд дискретний і кратний елементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. У замкненій системі сумарний заряд зберігається.

Закон Кулона: сила взаємодії двох точкових зарядів прямо пропорційна їх добутку й обернено пропорційна квадрату відстані, $F = k \cdot q_1 q_2 / r^2$.

2. Поле, напруженість, потенціал

Електричне поле — матеріальне середовище, через яке заряди взаємодіють. Силова характеристика — напруженість $E = F/q$, вимірюється у В/м. Енергетична характеристика — потенціал; практичне значення має різниця потенціалів, тобто напруга U .

Для плоского проміжку між електродами $E = U/d$. Ця проста формула — ключ до розуміння пробою: при незмінній напрузі зменшення зазору різко підвищує напруженість поля.

3. Провідники, діелектрики, пробій

У провідниках є вільні заряди; у діелектриках заряди зв'язані й лише зміщуються, поляризуючи середовище.

Кожен діелектрик має **електричну міцність** — граничну напруженість поля, вище якої настає **пробій**: у діелектрику лавиноподібно утворюються вільні заряди й виникає канал провідності. Для повітря це приблизно 3 кВ/мм, для трансформаторної олії — близько 10–20 кВ/мм.

Електроємність конденсатора $C = q/U$, вимірюється у фарадах. Енергія зарядженого конденсатора $W = CU^2/2$. Конденсатор здатний накопичувати енергію повільно, а віддавати її за мікросекунди — саме ця властивість використовується далі.

4. Електроерозійна обробка

Електроерозійна обробка (ЕЕО) — пряме технічне застосування явища пробою. Між інструментом-електродом і заготовкою, зануреними в діелектрик (гас, спеціальна рідина, деіонізована вода), підтримують зазор у соті частки міліметра. Генератор заряджає конденсатор; коли напруженість поля в зазорі перевищує електричну міцність рідини, відбувається пробій — виникає іскровий розряд.

У каналі розряду за мікросекунди виділяється енергія конденсатора, температура сягає 8 000–12 000 °С, мікрооб'єм металу плавиться й випаровується. Діелектрична рідина миттєво гасить розряд, вимиває продукти ерозії й відновлює ізоляцію проміжку. Цикл повторюється тисячі разів на секунду.

Принципові наслідки, що відрізняють ЕЕО від різання:

— **твердість заготовки не має значення**. Руйнування теплове, а не механічне, тому загартована сталь HRC 62 обробляється так само, як відпалена. Це головна причина застосування ЕЕО у виготовленні штампів і прес-форм;

— **механічна сила практично відсутня**, тому можна обробляти тонкостінні й нежорсткі деталі;

— **заготовка має бути електропровідною** — кераміку чи пластик так обробити не можна;

— інструмент теж зношується, бо ерозії зазнають обидва електроди.

Різновиди: прошивна ЕЕО (електрод-пуансон формує порожнину штампа) і дротяно-вирізна (тонкий дріт Ø0,1–0,3 мм різє контур за програмою — саме так виготовляють матриці й фасонні пуансони).

Статична електрика в цеху з ЧПК — зворотний бік тієї самої фізики. Сухе повітря, пластикові шланги, ремінні передачі й потік стружки накопичують заряд, а розряд на плату системи керування здатний вивести з ладу мікросхеми. Тому обов'язкові заземлення корпусів, антистатичні браслети при роботі з платами й контроль вологості повітря.

Ключові формули

- Закон Кулона: $F = k \cdot q_1 q_2 / r^2$, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
- Напруженість: $E = F/q$; для плоского проміжку $E = U/d$
- Ємність: $C = q/U$
- Енергія конденсатора: $W = C \cdot U^2 / 2$
- Умова пробою: $E \geq E_{\text{пр}}$

Питання для самоконтролю

1. Зазор між електродами і заготовкою становить 0,05 мм, електрична міцність рідини 12 кВ/мм. За якої напруги відбудеться пробій?
2. Чому електроерозійна обробка однаково легко ріже загартовану і незагартовану сталь, а кераміку не ріже взагалі?
3. Чому в цеху з верстатами з ЧПК контролюють вологість повітря?

ЛЕКЦІЯ 14

ПОСТІЙНИЙ СТРУМ. ЗАКОН ОМА. ОПІР. ЗАКОН ДЖОУЛЯ—ЛЕНЦА

План лекції

1. Умови існування струму. Сила струму й напруга.
2. Закон Ома. Опір провідника. Залежність опору від температури.
3. З'єднання провідників. ЕРС. Закон Ома для повного кола.
4. Робота й потужність струму. Закон Джоуля—Ленца.

1. Струм, сила струму, напруга

Електричний струм — упорядкований рух вільних носіїв заряду. Умови існування: наявність вільних носіїв і наявність електричного поля, тобто джерела ЕРС.

Сила струму $I = q/t$ вимірюється в амперах. Напруга — робота поля з перенесення одиничного заряду.

2. Закон Ома і опір

Закон Ома для ділянки кола: $I = U/R$.

Опір провідника $R = \rho \cdot l/S$, де ρ — питомий опір. Для міді $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для алюмінію $2,8 \cdot 10^{-8}$, для ніхрому $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ — у шістдесят разів більший за мідь, і саме тому з ніхрому роблять нагрівальні елементи.

Опір металів зростає з температурою: $R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$. Це не дрібниця, а робочий принцип **термоопорів** — датчиків температури, які вимірюють температуру за зміною опору платинової чи мідної спіралі. Такі датчики стоять у системах термостабілізації шпинделя й у баках МОР.

3. З'єднання провідників, ЕРС

Послідовне з'єднання: $R = R_1 + R_2 + \dots$, струм однаковий, напруги додаються.

Паралельне: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$, напруга однакова, струми додаються.

ЕРС джерела характеризує роботу сторонніх сил. Закон Ома для повного кола: $I = \varepsilon / (R + r)$, де r — внутрішній опір. Саме внутрішній опір і опір кабелю пояснюють «просідання» напруги в цеховій мережі при пуску потужного двигуна: пусковий струм у 5–7 разів більший за номінальний, і падіння напруги на лінії стає помітним — світло в цеху миготить.

4. Потужність і закон Джоуля—Ленца

Робота струму $A = U \cdot I \cdot t$, потужність $P = U \cdot I = I^2 R = U^2 / R$.

Закон Джоуля—Ленца: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$. Кількість теплоти пропорційна **квадрату** струму — саме тому перевантаження небезпечніше, ніж здається: зростання струму на 40 % подвоює тепловиділення.

Технічні застосування в цеху:

- **нагрівальні елементи** печей для термообробки, сушарок, паяльників: висока ρ ніхрому дає великий опір при малій довжині;
- **втрати в кабелі**. Той самий закон визначає нагрівання живильного кабелю верстата. Занижений переріз — систематична причина пожеж в електрошафах;
- **контактний опір**. Окислений або ослаблений контакт має підвищений опір, а отже, локально сильно гріється. Обгорілі клеми в шафі — не наслідок «поганого струму», а прямий результат закону Джоуля—Ленца;

— **захист**. Плавкий запобіжник і тепловий розчіплювач автомата працюють саме на цьому ефекті: нагрівання від струму розплавляє вставку або вигинає біметалеву пластину. Окремо зауважимо: нагрівання при контактному зварюванні (точковому, стиковому) також описується цим законом — теплота виділяється переважно в місці контакту деталей, де опір найбільший.

Ключові формули

- Сила струму: $I = q/t$
- Закон Ома для ділянки: $I = U/R$
- Опір: $R = \rho \cdot l/S$; залежність від температури: $R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$
- Послідовно: $R = \sum R_i$; паралельно: $1/R = \sum (1/R_i)$
- Закон Ома для повного кола: $I = \varepsilon/(R + r)$
- Потужність: $P = U \cdot I = I^2 R = U^2/R$
- Закон Джоуля—Ленца: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$

Питання для самоконтролю

1. ТЕН печі має опір 22 Ом і працює від 220 В. Які струм і потужність? Скільки теплоти виділиться за 10 хвилин?
2. Чому ослаблений контакт у клемній колодці верстата обгорає, хоча струм у колі номінальний?
3. Чому при пуску потужного двигуна в цеху короткочасно «сідає» напруга?

ЛЕКЦІЯ 15

СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ. НАПІВПРОВІДНИКИ. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА

План лекції

1. Струм у металах, рідинах, газах і вакуумі.
2. Електроліз і його застосування в машинобудуванні.
3. Напівпровідники. p—n перехід. Елементна база приводів.
4. Термоелектричні явища. Термопара й термоопір.

1. Струм у різних середовищах

У металах носії — вільні електрони; перенесення речовини немає. У рідинах-електролітах носіями є іони, і струм супроводжується перенесенням речовини до електродів. У газах провідність виникає лише після іонізації, а при досягненні певної напруженості поля розряд стає самостійним (лекція 13). У вакуумі носії створюють штучно — термоелектронною емісією.

2. Електроліз у машинобудуванні

Закон Фарадея: маса речовини, виділеної на електроді, пропорційна заряду, що пройшов через електроліт: $m = k \cdot I \cdot t$.

Застосування:

— **гальванічні покриття**: хромування, нікелювання, цинкування. Товщину шару розраховують саме за законом Фарадея, задаючи струм і час;

— **електрохімічна обробка (ЕХО)**: анодне розчинення металу заготовки в потоці електроліту. На відміну від ЕЕО, тут інструмент-катод практично не спрацьовується й не виникає термічного впливу на поверхню. Застосовується для обробки лопаток, складнофасонних порожнин, зняття задирок у важкодоступних місцях;

— **електрохімічне полірування й маркування** деталей із нержавної сталі.

3. Напівпровідники

Напівпровідники займають проміжне положення за питомим опором, причому їх опір із нагріванням **зменшується** — протилежно металам. Домішкова провідність буває електронною (n-тип) і дірковою (p-тип).

Контакт двох областей утворює **p—n перехід**, що проводить струм в одному напрямку — це діод. На цьому побудована вся силова електроніка верстата:

— випрямлячі, що живлять приводи постійним струмом;

— тиристори й IGBT-транзистори — силові ключі частотних перетворювачів (лекція 17);

- оптопарі, що гальванічно розділяють силову частину й систему ЧПК;
- фотодіоди й фототранзистори в оптичних датчиках положення та лічильниках імпульсів енкодерів;
- терморезистори (термістори) вбудовані в обмотки двигунів для захисту від перегріву.

Практичний наслідок температурної залежності: силова електроніка потребує охолодження, і саме тому електрошафа верстата з ЧПК має вентилятор або кондиціонер із фільтром. Забитий стружковим пилом фільтр — типова причина «плаваючих» відмов приводу в спекотний день.

4. Термоелектричні явища

Ефект Зеебека: у замкненому колі з двох різнорідних провідників при різній температурі спаїв виникає ЕРС, пропорційна різниці температур. На цьому побудовано **термопару** — основний засіб вимірювання високих температур: у печах термообробки, у розплавах, у зоні різання.

Термо-ЕРС мала (десятки мікрівольт на градус), тому термопара вимагає підсилювача й компенсації температури вільних кінців. Типи: хромель-алюмелева (до 1100 °C), платинородієва (до 1600 °C).

Для дослідження процесу різання застосовують метод **природної термопарі:** інструмент і заготовка з різних матеріалів самі утворюють спай у зоні контакту, і за виниклою ЕРС вимірюють середню температуру різання. Саме так отримано більшість табличних даних про температуру кромки.

Ефект Пельтьє — зворотний: при проходженні струму через спай різнорідних провідників теплота виділяється або поглинається залежно від напрямку струму. На ньому працюють компактні термоелектричні холодильники для стабілізації температури вимірювальних приладів і лазерних діодів.

Ключові формули

- Закон Фарадея: $m = k \cdot I \cdot t$
- Товщина гальванічного шару: $h = m / (\rho \cdot S)$
- Термо-ЕРС: $\varepsilon = \alpha \cdot (T_1 - T_2)$
- Опір термометра опору: $R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$

Питання для самоконтролю

1. У чому принципова різниця між електроерозійною та електрохімічною обробкою за характером руйнування металу?
2. Чому опір напівпровідника з нагріванням падає, а опір міді — зростає? До чого це зобов'язує при експлуатації електрошафи верстата?
3. Як влаштований метод природної термопарі й що саме він вимірює?

ЛЕКЦІЯ 16

МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. ПРИНЦИП ДІЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

План лекції

1. Магнітне поле струму. Індукція. Сила Ампера і сила Лоренца.
2. Феромагнетики. Магнітні затискні пристрої.
3. Електромагнітна індукція. Закон Фарадея. Самоіндукція.
4. Вихрові струми: індукційне нагрівання та дефектоскопія.

1. Магнітне поле

Магнітне поле створюється рухомими зарядами й діє на рухомі заряди. Силова характеристика — магнітна індукція B , вимірюється в теслах.

На провідник зі струмом у магнітному полі діє **сила Ампера** $F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$. Саме вона створює обертальний момент в електродвигуні. На окремий рухомий заряд діє **сила Лоренца** $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$.

2. Феромагнетики й магнітні пристосування

Речовини поділяють на діа-, пара- і феромагнетики. Останні (залізо, нікель, кобальт і їх сплави) багаторазово підсилюють поле завдяки впорядкуванню доменів. Вище точки Кюрі (для заліза 768 °C) феромагнітні властивості зникають.

Технічне застосування в цеху пряме:

— **магнітна плита** плоскошліфувального верстата утримує деталь без механічного затиску, не деформуючи її. Обмеження очевидне з фізики: тримає лише феромагнітні матеріали, тож алюміній, латунь і аустенітну нержавну сталь закріпити так не вдасться;

— **електромагнітні патрони й кутники**;

— **магнітні стійки** для індикаторів, що фіксуються до станини одним поворотом ручки;

— **магнітні сепаратори** в системі МОР, що вловлюють сталевий шлам;

— залишковий магнетизм — проблема, а не властивість: намагнічена після шліфування деталь притягує стружку, тому її розмагнічують у демагнітизаторі змінним полем спадної амплітуди.

3. Електромагнітна індукція

Закон Фарадея: при зміні магнітного потоку через контур у ньому виникає ЕРС індукції, пропорційна швидкості зміни потоку. Правило Ленца: індукційний струм завжди протидіє причині, що його викликала.

Принцип дії електродвигуна — дія сили Ампера на провідники обмотки ротора. У найпоширенішому асинхронному двигуні обертове магнітне поле статора наводить струми в короткозамкненому роторі, і взаємодія цих струмів із полем створює момент. Ротор обертається трохи повільніше за поле — звідси назва «асинхронний» і поняття ковзання.

Генераторний режим — те саме навпаки. Він не екзотика: при гальмуванні шпинделя двигун працює генератором, і енергія або гаситься на гальмівному резисторі, або повертається в мережу (рекуперація). Саме тому в шафі потужного верстата з ЧПК стоїть гальмівний резистор, який помітно гріється при частих розгонах-гальмуваннях.

Самоіндукція — ЕРС, що виникає в котушці при зміні струму в ній самій. Практичний наслідок: при розриві кола з індуктивністю (обмотка контактора, електромагніт) виникає значний імпульс напруги, що іскрить на контактах і здатний пошкодити електроніку. Тому паралельно котушкам ставлять діоди або RC-ланки.

4. Вихрові струми

У суцільному провіднику змінне магнітне поле наводить замкнені **вихрові струми** (струми Фуко). Вони мають два обличчя.

Шкідливе: нагрівають осердя трансформаторів і двигунів, тому осердя набирають із тонких ізольованих пластин.

Корисне — три важливі для машинобудування застосування:

— **індукційне нагрівання**. Деталь поміщають в індуктор із змінним струмом високої частоти; вихрові струми розігрівають її за секунди. Чим вища частота, тим тонший шар, у якому вони течуть (скін-ефект), — це дає **поверхнєве гартування ТВЧ** із точно керованою глибиною шару (лекція 12). Той самий принцип у індукційних нагрівачах підшипників, які за хвилину розширюють кільце для теплового складання (лекція 11);

— **вихрострумова дефектоскопія**. Датчик із котушкою наводить вихрові струми в поверхневому шарі деталі; тріщина або неоднорідність змінює їх картину, і це фіксується зміною імпедансу котушки. Метод виявляє поверхневі й підповерхневі дефекти без контакту й без розбирання;

— **індукційні безконтактні датчики** положення й наявності деталі — базовий елемент автоматизації верстата, що спрацьовує на наближення металу.

Ключові формули

– Сила Ампера: $F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$

– Сила Лоренца: $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$

– Магнітний потік: $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$

– Закон електромагнітної індукції: $\varepsilon = -\Delta\Phi/\Delta t$

– ЕРС самоіндукції: $\varepsilon = -L \cdot \Delta I/\Delta t$

– Енергія магнітного поля котушки: $W = L \cdot I^2/2$

Питання для самоконтролю

1. Чому на магнітній плиті шліфувального верстата не можна закріпити деталь з аустенітної нержавної сталі?

2. Поясніть, як вихрові струми дозволяють загартувати лише поверхневий шар зубця колеса, не змінюючи серцевину.
3. Навіщо у шафі верстата з ЧПК встановлюють гальмівний резистор і чому він нагрівається?

ЛЕКЦІЯ 17

ЗМІННИЙ СТРУМ. ТРАНСФОРМАТОР. ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ. ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА

План лекції

1. Змінний струм. Діючі значення. Трифазна система.
2. Опори в колі змінного струму. Коефіцієнт потужності.
3. Трансформатор. Частотний перетворювач. Приводи верстатів з ЧПК.
4. Дія струму на людину. Захисні заходи.

1. Змінний струм і трифазна система

Змінний струм змінюється за синусоїдою з частотою 50 Гц. Діючі (ефективні) значення пов'язані з амплітудними: $U = U_m/\sqrt{2}$. Побутові 220 В і цехові 380 В — саме діючі значення.

Трифазна система дає два рівні напруги: фазну 220 В і лінійну 380 В. Її головна перевага — створення обертового магнітного поля без додаткових пристроїв, що й зробило асинхронний двигун основним приводом промисловості.

2. Опори й коефіцієнт потужності

У колі змінного струму крім активного опору діють індуктивний $X_L = \omega L$ і ємнісний $X_C = 1/(\omega C)$. Повний опір $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

Активна потужність $P = U \cdot I \cdot \cos \phi$. Коефіцієнт потужності $\cos \phi$ показує, яка частка повної потужності виконує корисну роботу. Двигун, що працює недовантаженим, має низький $\cos \phi$: він «ганяє» реактивну потужність мережею, завантажуючи кабелі й трансформатор без користі. Тому недовантажений двигун — не економія, а перевитрата, і тому в цехах ставлять конденсаторні установки компенсації реактивної потужності.

3. Трансформатор і частотний перетворювач

Трансформатор працює на явищі взаємної індукції; коефіцієнт трансформації $k = U_1/U_2 = N_1/N_2$. Потужність (за винятком втрат) зберігається: підвищуючи напругу, трансформатор у стільки ж разів знижує струм. У верстаті трансформатори живлять кола керування (зазвичай 24 В) і освітлення, а також узгоджують мережу з електронікою імпортного обладнання.

Частота обертання асинхронного двигуна визначається частотою мережі й числом пар полюсів: $n = 60f/p$.

Із цієї формули випливає принцип **частотного регулювання**: змінюючи частоту живлення, ми плавно змінюємо оберти. Частотний перетворювач робить це у два етапи: випрямляє мережну напругу на постійну, а потім силовими ключами (IGBT-транзисторами, лекція 15) формує з неї напругу потрібної частоти.

Що це дало верстатобудуванню:

- безступінчасте регулювання обертів шпинделя замість громіздкої коробки швидкостей;
- можливість реалізувати режим сталої швидкості різання G96 (лекція 2), бо система керування може змінювати оберти безперервно;
- плавний пуск без ударного пускового струму;
- кероване гальмування й рекуперацію.

У приводах подачі верстатів з ЧПК застосовують **серводвигуни** із зворотним зв'язком за положенням: енкодер (оптичний або індукційний) повідомляє системі фактичне положення, і та коригує струм. Крім них поширені **крокові двигуни**, що повертаються на фіксований кут на кожен імпульс; вони простіші, але працюють без зворотного зв'язку й можуть «загубити крок» при перевантаженні — звідси брак, помітний лише після закінчення програми.

4. Електробезпека

Небезпечним є струм, а не напруга сама по собі. Відчутний струм — від 1 мА, невідпускний — близько 10–15 мА, фібриляційний — від 100 мА. Опір тіла людини різко падає при вологій шкірі, а в цеху руки часто в емульсії.

Захисні заходи, обов'язкові на верстаті: захисне заземлення й занулення корпусу; пристрій захисного вимкнення (ПЗВ), що реагує на струм витоку; ізоляція та блокувальні кінцеві вимикачі на дверцятах огорож і електрошафи; знижена напруга місцевого освітлення (24 або 36 В); заборона працювати з відкритою шафою під напругою.

Окремо: частотний перетворювач після вимкнення живлення ще кілька хвилин утримує заряджені конденсатори проміжної ланки під високою напругою. Тому на шафах є табличка з витримкою часу, і нехтувати нею смертельно небезпечно.

Ключові формули

– Діюче значення: $U = U_m / \sqrt{2}$

– Індуктивний опір: $X_L = 2\pi f \cdot L$; ємнісний: $X_C = 1 / (2\pi f \cdot C)$

– Повний опір: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

– Активна потужність: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

– Коефіцієнт трансформації: $k = U_1 / U_2 = N_1 / N_2$

– Частота обертання: $n = 60f/p$

Питання для самоконтролю

1. Асинхронний двигун має 2 пари полюсів. Яка його синхронна частота обертання при 50 Гц і при 35 Гц?
2. Чому робота двигуна з малим завантаженням не вигідна для цеху, хоча він і споживає менше активної потужності?
3. Чому після вимкнення живлення шафу з частотним перетворювачем не можна відкривати одразу?

МОДУЛЬ IV. КОЛИВАННЯ, ХВИЛІ ТА ОПТИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 18

КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ. РЕЗОНАНС. ЗВУК І УЛЬТРАЗВУК

План лекції

1. Механічні коливання. Гармонічні коливання, період, частота.
2. Вільні, вимушені коливання та резонанс.
3. Вібрація при різанні. Автоколивання. Балансування.
4. Хвилі. Звук і ультразвук у машинобудуванні.

1. Механічні коливання

Коливання — рух, що повторюється в часі. Гармонічне коливання описується синусоїдою; характеризується амплітудою, періодом T , частотою $f = 1/T$ і фазою.

Період пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, математичного — $T = 2\pi\sqrt{l/g}$. Для інженера важлива саме структура першої формули: **власна частота системи визначається відношенням жорсткості до маси**. Збільшити жорсткість або зменшити масу — значить підняти власну частоту; це головний важіль боротьби з вібрацією.

2. Резонанс

Вільні коливання затухають через тертя. Вимушені відбуваються під дією періодичної зовнішньої сили з її частотою. Коли частота змущувальної сили наближається до власної, амплітуда різко зростає — настає **резонанс**.

Резонанс небезпечний тим, що руйнування настає при цілком помірній силі: енергія накопичується циклами. У верстаті джерелом періодичної сили є дисбаланс ротора, зубчасті зачеплення, а найчастіше — переривчасте різання.

3. Вібрація при різанні

Розрізняють два принципово різні види вібрацій, і плутати їх не можна.

Вимушені коливання мають зовнішнє періодичне джерело: дисбаланс шпинделя або оправки, биття заготовки, удари зубів фрези, дефект підшипника. Їх частота жорстко пов'язана з обертами, тому вони й діагностуються за спектром вібрації: підвищена складова на частоті обертання вказує на дисбаланс, на частоті зубозачеплення — на зношений редуктор.

Автоколивання (chatter) виникають без зовнішнього періодичного джерела — сама система «різець—деталь» стає нестійкою. Механізм такий: випадкове коливання залишає хвилястий слід на поверхні; наступного оберту різець зрізає шар змінної товщини, отже, сила різання стає змінною і підживлює коливання. Виникає самопідсилення. Ознака в цеху — характерний високий свист і регулярні «риски» на поверхні.

Практичні способи придушення автоколивань впливають із фізики:

— **змінити оберти**. Оскільки явище пов'язане з фазовим збігом слідів між обертами, зміна частоти обертання на 10–15 % часто повністю усуває свист. Це найдешевший і найпоширеніший прийом;

— **підвищити жорсткість системи**: скоротити виліт інструмента, підвести люнет, замінити оправку на коротшу;

— **зменшити ширину зрізуваного шару**, а не подачу: стійкість залежить передусім від ширини різання;

— застосувати **фрези зі змінним кроком зубів**, у яких удари не повторюються періодично, і **антивібраційні оправки** з вбудованим демпфером маси.

Балансування обертових частин — пряма боротьба з вимушеними коливаннями. Відцентрова сила від дисбалансу пропорційна квадрату обертів (лекція 2), тому для високошвидкісних шпинделів балансують не лише оправку, а й інструмент із патроном у зборі.

4. Хвилі. Ультразвук

Хвиля — поширення коливань у середовищі; $v = \lambda \cdot f$. Розрізняють поперечні та поздовжні хвилі. Звук — поздовжні хвилі в діапазоні 16 Гц — 20 кГц; вище лежить **ультразвук**, і саме він дав машинобудуванню два потужні інструменти.

Ультразвукова дефектоскопія. Ультразвукова хвиля (зазвичай 2–10 МГц), уведена в деталь через контактний шар, відбивається від границь середовищ. Якщо всередині є тріщина, пора чи непровар, ехосигнал приходить раніше за донний, і за часом затримки визначають глибину залягання дефекту: $h = v \cdot t / 2$. Швидкість поздовжньої хвилі в сталі близько 5900 м/с. Метод — основний для контролю зварних швів, поковок і великих валів.

Ультразвукова обробка й очищення. Магнітострикційний або п'єзоелектричний випромінювач надає інструменту коливань із частотою 18–25 кГц і малою амплітудою; в зазор подають абразивну суспензію, і мікроудари зерен вибивають частинки матеріалу. Так обробляють тверді крихкі матеріали — кераміку, скло, ситали, тверді сплави. Той самий ефект кавітації в рідині використовують у ваннах ультразвукового очищення деталей від мастила, стружки й притирального шламу.

Ключові формули

– Період і частота: $T = 1/f$; циклічна частота $\omega = 2\pi f$

– Період пружинного маятника: $T = 2\pi\sqrt{m/k}$

– Умова резонансу: $f_{\text{змушувальна}} \approx f_{\text{власна}}$

– Швидкість хвилі: $v = \lambda \cdot f$

– Глибина залягання дефекту: $h = v \cdot t / 2$

– Частота зубозачеплення фрези: $f_z = z \cdot n / 60$

Питання для самоконтролю

1. При фрезеруванні з'явився характерний свист і регулярні риси на поверхні. Назвіть три способи усунути це й поясніть фізику кожного.
2. Фреза з 4 зубами обертається з частотою 1200 об/хв. Яка частота ударів зубів? Чому цю величину важливо знати?
3. Ехосигнал від дефекту в сталевій поковці прийшов через 10 мкс. На якій глибині дефект?

ЛЕКЦІЯ 19

ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ОПТИКА. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ЛАЗЕР

План лекції

1. Шкала електромагнітних хвиль.

2. Геометрична та хвильова оптика. Оптичні засоби вимірювання.
3. Теплове випромінювання. Пірометрія й тепловізор.
4. Квантова оптика. Фотоефект. Лазер і лазерні технології.

1. Шкала електромагнітних хвиль

Усі електромагнітні хвилі поширюються у вакуумі зі швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с і пов'язані співвідношенням $c = \lambda \cdot f$. Шкала за зростанням частоти: радіохвилі — мікрохвилі — інфрачервоне випромінювання — видиме світло (380–760 нм) — ультрафіолет — рентгенівське — гамма-випромінювання. Природа єдина, різняться лише енергія кванта й механізм взаємодії з речовиною.

2. Оптика і вимірювання

Закони відбивання й заломлення лежать в основі оптичних приладів цеху: мікроскопів для контролю зношення різальної кромки, проєкторів для перевірки профілю різьби й фасонних різців, інструментальних мікроскопів.

Хвильові явища — інтерференція й дифракція — дають найточніші засоби вимірювання:

— **інтерференційний контроль площинності**. Плоскопаралельну скляну пластину кладуть на перевірювану поверхню; у місцях зазору виникають смуги інтерференції. Одна смуга відповідає зміні зазору на півдовжини хвилі, тобто близько 0,3 мкм. Так атестують кінцеві міри й перевіряють доведені поверхні;

— **лазерний інтерферометр** — еталонний засіб перевірки точності позиціонування осей верстата з ЧПК. Саме ним вимірюють накопичену похибку кулько-гвинтової передачі й складають таблицю компенсації в системі керування;

— **оптичні лінійки та енкодери**, що працюють на дифракційній ґратці: система зчитує штрихи й визначає положення стола з точністю до часток мікрометра. Це основа зворотного зв'язку за положенням у точних верстатах.

3. Теплове випромінювання

Будь-яке тіло з температурою вище абсолютного нуля випромінює електромагнітні хвилі. Закон Стефана—Больцмана: потужність випромінювання пропорційна **четвертому степеню** абсолютної температури. Закон зміщення Віна: із зростанням температури максимум випромінювання зміщується в бік коротших хвиль — саме тому нагріта сталь спочатку світиться темно-червоним, потім жовтим, а при 1300 °С — майже білим.

Технічні застосування:

— **пірометр** — безконтактний вимір температури за інтенсивністю випромінювання. Незамінний у ковальсько-пресовому виробництві й при контролі печей термообробки, де контактний датчик неможливий. Головна засторога: показання залежать від **коефіцієнта випромінювання поверхні**, і блискуча полірована сталь «здається» пірометру значно холоднішою, ніж є. Тому прилад калібрують під матеріал або наносять на ділянку матову мітку;

— **тепловізор** — будує температурне поле поверхні. У механічному цеху ним шукають перегріті підшипники шпинделя, гарячі точки в електрошафі, обгорілі контакти, нерівномірний нагрів напрямних.

4. Квантова оптика і лазер

Світло має подвійну природу. Енергія кванта $E = h \cdot \nu$, де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Фотоефект — вибивання електронів світлом; рівняння Ейнштейна: $h \cdot \nu = A_{\text{вих}} + W_{\text{к}}$. Практичне значення — фотоелементи оптичних датчиків, фотобар'єри огорож, оптопари в приводах.

Лазер дає когерентне монохроматичне випромінювання з надзвичайно малою розбіжністю пучка, яке можна сфокусувати в пляму діаметром у десяті частки міліметра. Густина потужності в фокусі досягає 10^6 – 10^8 Вт/см² — метал миттєво плавиться й випаровується.

Лазерні технології в машинобудуванні:

— **різання** листового металу: вузький різ, мала зона термічного впливу, висока швидкість, повна автоматизація за програмою;

— **зварювання** з глибоким проплавленням і мінімальним викривленням деталей;

- **маркування** деталей, нанесення номерів і QR-кодів — операція, обов'язкова для простежуваності;
- **лазерне наплавлення й адитивні технології (SLM/DMLS)**: пошарове сплавляння металевого порошку, тобто 3D-друк металом;
- **лазерне гартування** поверхневого шару без деформації деталі;
- **вимірювання**: інтерферометри, датчики відстані, системи вимірювання інструмента в шпинделі.

Безпека: лазерне випромінювання небезпечно для очей навіть при відбитті від блискучої поверхні. Робота ведеться лише за закритими світлозахисними шторами та огорожами відповідного класу.

Ключові формули

- Зв'язок довжини хвилі й частоти: $c = \lambda \cdot f$
- Енергія кванта: $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$
- Рівняння фотоефекту: $h \cdot \nu = A_{\text{вих}} + m \cdot v^2 / 2$
- Закон Стефана—Больцмана: $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$
- Закон зміщення Віна: $\lambda_{\text{мах}} = b / T$, $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
- Крок інтерференційних смуг: $\Delta h = \lambda / 2$

Питання для самоконтролю

1. Пірометр показує на блискучій полірованій заготовці температуру значно нижчу за фактичну. Поясніть причину й спосіб усунення.
2. Температуру нагрітої деталі підвищили з 600 до 1200 К. У скільки разів зросла потужність її теплового випромінювання?
3. Що саме вимірює лазерний інтерферометр при атестації верстата з ЧПК і навіщо це потрібно?

МОДУЛЬ V. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 20

БУДОВА АТОМА. СПЕКТРИ. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ. РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

План лекції

1. Будова атома. Постулати Бора.
2. Спектри випускання й поглинання. Спектральний аналіз.
3. Визначення марки сталі: стилоскоп і спектрометр.
4. Рентгенівське випромінювання. Радіографічний контроль.

1. Будова атома

Планетарна модель Резерфорда: масивне позитивне ядро й електрони навколо. Постулати Бора: електрон рухається лише по дозволених стаціонарних орбітах, не випромінюючи; випромінювання або поглинання кванта відбувається лише при переході між рівнями, причому $h \cdot \nu = E_2 - E_1$.

Оскільки набір рівнів у кожного хімічного елемента свій, кожен елемент випромінює строго свій набір частот. Це фізична основа всього подальшого.

2. Спектральний аналіз

Спектри бувають суцільні (розжарені тверді тіла й рідини), лінійчасті (розріджені гази й пари — атомарне випромінювання) і смугасті (молекулярні). Спектр поглинання — «негатив» лінійчастого.

Спектральний аналіз — визначення хімічного складу речовини за її спектром. Метод має винятково високу чутливість і, що важливо для виробництва, не потребує руйнування деталі.

3. Визначення марки сталі у цеху

Для машинобудування це не теоретичний сюжет, а щоденна процедура вхідного контролю. Плутанина марок — одна з найдорожчих помилок: заготовка з іншої сталі не витримає термообробки або зруйнується в експлуатації.

— **Стилоскоп** — переносний оптичний прилад. Між електродом і деталлю збуджують дугу; пари металу світяться, і оператор через окуляр порівнює наявність характерних ліній із еталонними таблицями. Метод якісний або напівкількісний, але дає відповідь за хвилину прямо на складі.

— **Оптико-емісійний спектрометр** (стаціонарний або портативний) робить те саме кількісно: фотоприймачі вимірюють інтенсивність ліній, і прилад видає повний хімічний склад у відсотках із визначенням марки за базою. Іскровий розряд залишає невелику матову пляму — це єдиний «слід» на деталі.

— **Рентгенофлуоресцентний аналізатор (XRF)** збуджує атоми рентгенівським випромінюванням і аналізує характеристичне випромінювання у відповідь. Повністю неруйнівний, зручний для сортування металобрухту й ідентифікації сплавів, але погано визначає вуглець, що для сталей є суттєвим обмеженням.

Для повноти зазначимо й найпростіший цеховий метод — **іскрову пробу** на точилі: за формою й кольором пучка іскор досвідчений робітник відрізняє вуглецеву сталь від легованої. Метод суб'єктивний і придатний лише для грубого сортування.

4. Рентгенівське випромінювання

Рентгенівське випромінювання виникає при різкому гальмуванні швидких електронів на аноді рентгенівської трубки. Воно має малу довжину хвилі (10^{-8} – 10^{-12} м) і високу проникну здатність; поглинання залежить від густини й товщини матеріалу.

Саме на цьому базується **радіографічний контроль**: деталь просвічують, а за нею розміщують плівку або цифровий детектор. Там, де є пора, раковина, шлакове включення чи непровар, матеріалу менше, поглинання слабше, і на знімку з'являється темніша ділянка. Метод є основним для контролю зварних швів і відповідальних відливок, бо дає наочне зображення внутрішнього дефекту.

Порівняно з ультразвуковим контролем (лекція 18) рентген краще виявляє об'ємні дефекти (пори, раковини) і гірше — площинні тріщини, орієнтовані вздовж пучка. Тому на відповідальних об'єктах методи застосовують разом.

Ключові формули

– Умова випромінювання кванта: $h \cdot \nu = E_2 - E_1$

– Енергія кванта: $E = h \cdot c / \lambda$

– Закон послаблення випромінювання: $I = I_0 \cdot e^{(-\mu d)}$

– Максимальна енергія рентгенівського кванта: $E = e \cdot U$

Питання для самоконтролю

1. Чому кожен хімічний елемент дає власний, притаманний лише йому набір спектральних ліній?
2. На складі змішалися заготовки зі сталі 45 і 40Х. Якими методами й у якій послідовності ви їх розсортуйте?
3. Який тип дефектів краще виявляє рентгенографія, а який — ультразвуковий контроль?

ЛЕКЦІЯ 21

БУДОВА ЯДРА. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ГАММА-ДЕФЕКТОСКОПІЯ. ДОЗИ ТА ЗАХИСТ

План лекції

1. Будова ядра. Ядерні сили. Енергія зв'язку.
2. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.
3. Гамма-дефектоскопія й радіоізотопні прилади.
4. Дози опромінення. Радіаційний захист. Сучасна фізична картина світу.

1. Будова ядра

Ядро складається з протонів і нейтронів, що утримуються ядерними силами — найпотужнішими з відомих, але короткодійними. Дефект маси й енергія зв'язку пов'язані співвідношенням Ейнштейна $E = mc^2$. Питома енергія зв'язку максимальна для елементів середини таблиці — звідси впливає можливість виділення енергії як при поділі важких ядер, так і при синтезі легких.

2. Радіоактивність

Радіоактивність — самочинне перетворення нестійких ядер із випромінюванням. Види:

- **α -випромінювання** — ядра гелію; затримується аркушем паперу, але дуже небезпечно при потраплянні всередину організму;
- **β -випромінювання** — електрони; затримується алюмінієвою пластиною кілька міліметрів;
- **γ -випромінювання** — електромагнітні хвилі найвищої енергії; послаблюється товстим шаром свинцю чи бетону, повністю не затримується ніколи.

Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{(-t/T_{1/2})}$, де $T_{1/2}$ — період напіврозпаду. Активність вимірюють у беккерелях.

3. Радіаційні методи в машинобудуванні

Гамма-дефектоскопія — той самий принцип, що й радіографія (лекція 20), але джерелом є радіоізотоп, найчастіше іридій-192 ($T_{1/2} \approx 74$ доби) або кобальт-60 ($T_{1/2} \approx 5,3$ року). Переваги перед рентгенівським апаратом — автономність (не потрібна електромережа), компактність і здатність просвічувати великі товщини. Застосовується для контролю зварних швів трубопроводів і металоконструкцій у польових умовах.

Зворотний бік — джерело не можна «вимкнути». Воно випромінює безперервно, тому зберігається у свинцевому контейнері й виводиться на робочу позицію дистанційно. Роботи виконують за нарядом-допуском, із оцепленням зони та індивідуальними дозиметрами.

Із періодом напіврозпаду пов'язана й практична особливість експлуатації: активність джерела з часом падає, тому час експозиції періодично перераховують — саме тут працює закон розпаду.

Радіоізотопні товщиноміри й рівнеміри використовують залежність послаблення випромінювання від товщини матеріалу. Їх ставлять на прокатних станах для безконтактного вимірювання товщини стрічки в потоці.

4. Дози й захист

Поглинена доза (грей) — енергія випромінювання на кілограм речовини. Еквівалентна доза (зіверт) враховує різну біологічну дію видів випромінювання. Природний фон становить приблизно 2–3 мЗв на рік.

Три класичні принципи захисту:

- **захист часом** — скоротити тривалість перебування в зоні;
- **захист відстанню** — інтенсивність спадає обернено пропорційно квадрату відстані, тому подвоєння відстані зменшує дозу вчетверо. Це найдешевший і найдієвіший захід;
- **захист екрануванням** — свинець, бетон, сталь.

Обов'язкові організаційні заходи: знак радіаційної небезпеки, огороження зони, індивідуальні дозиметри, облік і зберігання джерел, навчання та допуск персоналу.

Сучасна фізична картина світу

Курс завершується поглядом назад. Класична механіка, термодинаміка, електродинаміка, квантова й ядерна фізика — не змінні одна одній теорії, а вкладені рівні опису, кожен зі своєю межею застосовності. Ньютонова механіка не «спростована» — вона залишається точною для швидкостей і масштабів вашого верстата; квантова механіка не скасовує її, а описує те, чого вона не охоплює.

Для інженера з цього впливає головне професійне вміння: свідомо обирати рівень опису, достатній для задачі, і чесно розуміти, де цей рівень закінчується. Розрахувати режим різання можна законами Ньютона; пояснити, чому твердий сплав зберігає твердість при 900 °C, — уже ні.

Ключові формули

- Енергія зв'язку: $E = \Delta m \cdot c^2$
- Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{(-t/T_{1/2})}$
- Активність: $A = \Delta N / \Delta t$
- Послаблення γ -випромінювання: $I = I_0 \cdot e^{(-\mu d)}$
- Залежність від відстані: $I_1 / I_2 = (r_2 / r_1)^2$
- Еквівалентна доза: $H = D \cdot k$

Питання для самоконтролю

1. Активність джерела іридію-192 становила 100 %. Якою вона стане через 148 діб (два періоди напіврозпаду)?
2. Дефектоскопіст відійшов від джерела з 2 до 6 метрів. У скільки разів зменшилася потужність дози?
3. У чому практична перевага гамма-дефектоскопії перед рентгенівською і чим за неї доводиться платити?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Засєкін Д. О., Засєкіна Т. М. Фізика і астрономія (рівень стандарту) : підручник для 10 (11) класу закладів загальної середньої освіти. Київ : Оріон, 2018–2019.
2. Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О. та ін. Фізика і астрономія : підручник для закладів загальної середньої освіти. Харків : Ранок, 2019.
3. Загальний курс фізики для закладів фахової передвищої освіти : навчальний посібник. — електронна бібліотека ІМЗО.

Фахово-орієнтована

4. Довідник технолога-машинобудівника : у 2 т. — довідкові таблиці режимів різання, допусків і посадок.
5. Матеріалознавство та термічна обробка металів : навчальний посібник для закладів фахової передвищої освіти.
6. Металорізальні верстати : навчальний посібник.
7. Неруйнівний контроль : ультразвуковий, радіаційний, вихрострумовий методи : навчальний посібник.

Нормативна

8. ДСТУ ISO 1 : Геометричні характеристики виробів. Стандартна довідкова температура для визначення розмірів і форми (20 °C).
9. ДСТУ 2681 : Метрологія. Терміни та визначення.
10. ДСТУ ISO 286-1 : Допуски й посадки. Система допусків для лінійних розмірів.

Інформаційні ресурси

11. Електронна бібліотека Інституту модернізації змісту освіти: lib.imzo.gov.ua
12. Національний репозитарій академічних текстів: nrat.ukrintei.ua
13. Освітня платформа коледжу (дистанційний курс з дисципліни «Фізика»).