



ЗАТВЕРДЖЕНО

Заступник директора з НВР ЗПО «ДПТК»

Сергій ГОРДІЄНО

» серпня 2026 р.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

21 лекція, 42 години. П'ять змістових модулів

Дисципліна: Фізика (ОК 7)

Галузь знань: G — Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність: G9 — Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма: «Зварювальне виробництво»

Освітньо-професійний ступінь: фаховий молодший бакалавр

ПЕРЕДМОВА

Конспект розроблено як основне навчальне джерело з дисципліни «Фізика» для здобувачів спеціальності G9 — Прикладна механіка, освітньо-професійна програма «Зварювальне виробництво».

Його призначення — не переказати підручник загальної фізики, а відібрати з нього те, що безпосередньо працює у зварювальному виробництві: у горінні дуги, у плавленні й кристалізації металу, у виникненні залишкових напружень і деформацій, у контролі якості шва, — і подати у зв'язці з обладнанням, з яким ви матимете справу.

Фізика викладається в першому семестрі й є фундаментом для дисциплін, що йдуть далі: технічної механіки, матеріалознавства та термічної обробки, електротехніки з основами електроніки, взаємозамінності й технічних вимірювань, а згодом — технологічних основ зварювання плавленням, обладнання зварювання, зварних конструкцій і контролю якості зварювання. Майже кожен параграф цього конспекту має своє продовження в одній із цих дисциплін.

Структура курсу відповідає загальноприйнятій послідовності розділів фізики, тому конспект узгоджується з підручниками, доступними в Електронній бібліотеці ІМЗО: механіка — молекулярна фізика і термодинаміка — електрика і магнетизм — коливання, хвилі та оптика — атомна і ядерна фізика.

Кожна лекція побудована однаково: план, теоретичний виклад із виходом на конкретне застосування, перелік ключових формул і питання для самоконтролю. Питання для самоконтролю не є формальністю — саме на їх основі формуються завдання модульних контролів.

Розподіл матеріалу за модулями:

№	Модуль	Лекцій	Практ.	СР	Годин
I	Механіка та основи гідростатики	10	8	12	30
II	Молекулярна фізика і термодинаміка	14	10	16	40
III	Електрика і магнетизм	10	6	12	28
IV	Коливання, хвилі та оптика	4	4	5	13
V	Атомна та ядерна фізика	4	2	3	9
	РАЗОМ	42	30	48	120

Модульний контроль № 1 охоплює модулі I–II, модульний контроль № 2 — модулі III–V.

МОДУЛЬ I. МЕХАНІКА ТА ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ

5 лекцій, 10 годин

ЛЕКЦІЯ 1

ФІЗИКА ЯК НАУКА. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ, СІ, ВИМІРЮВАННЯ ТА ПОХИБКИ

План лекції

1. Предмет і методи фізики. Явище, модель, закон, теорія.
2. Фізичні величини. Міжнародна система одиниць СІ.
3. Прямі та непрямі вимірювання. Похибки.
4. Точність вимірювань у зварювальному виробництві.

1. Предмет і методи фізики

Фізика вивчає найзагальніші властивості матерії та форми її руху. Для техника-технолога зі зварювання це означає просту річ: будь-який виробничий процес, від горіння дуги до появи тріщини в шві, підпорядковується фізичним законам, і ці закони можна записати кількісно.

Шлях фізичного пізнання завжди однаковий: спостереження явища — побудова моделі — формулювання закону — перевірка експериментом. Модель завжди спрощує дійсність. Наприклад, зварювальну ванну моделюють як рідину з певним поверхневим натягом і теплоємністю, свідомо нехтуючи хімічними реакціями в ній. Модель працює доти, доки нехтування виправдане.

Звідси головне практичне правило: кожна формула має межі застосовності. Формула, справедлива для сталі при кімнатній температурі, може дати грубу помилку для того самого металу при 1500 °С.

2. Фізичні величини та СІ

Фізична величина — характеристика об'єкта чи процесу, яку можна виміряти. Вимірювання означає порівняння з одиницею.

Міжнародна система одиниць СІ має сім основних одиниць: метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, моль і кандела. Решта одиниць — похідні. У зварюванні найчастіше працюють з ампером (зварювальний струм), вольт (напруга на дузі), паскалем і мегапаскалем (тиск у балоні, напруження в шві), джоулем і кілоджоулем на міліметр (погонна енергія), градусом Цельсія і кельвіном (температура підігріву).

У виробничій документації зустрічаються позасистемні одиниці: бар і атмосфера для тиску в балонах, кілограм-сила на квадратний міліметр у старих кресленнях, літр за хвилину для витрати захисного газу. Переведення в СІ треба виконувати перед розрахунком, а не після.

Слід окремо розрізняти масу і вагу. Маса електродного покриття вимірюється в кілограмах, вага балона з газом — сила в ньютонах. У побутовій мові їх плутають, у розрахунку вантажопідіймальних пристроїв така плутанина коштує дорого.

3. Вимірювання та похибки

Вимірювання бувають прямі та непрямі. Прямо вимірюють струм кліщами, напругу вольтметром, катет шва шаблоном. Непрямо визначають погонну енергію, площу наплавлення, залишкове напруження — їх обчислюють за результатами прямих вимірювань.

Похибка супроводжує будь-яке вимірювання. Абсолютна похибка виражається в одиницях самої величини, відносна — у відсотках. Систематична похибка викликана несправністю приладу або методикою і повторюється однаково; випадкова змінюється від досліду до досліду й зменшується усередненням.

Для непрямих вимірювань похибки накопичуються: при множенні й діленні складаються відносні похибки, при додаванні — абсолютні. Тому точність кінцевого результату визначає найгірший із приладів у ланцюжку.

4. Точність у зварювальному виробництві

Клас точності приладу показує його зведену похибку у відсотках від верхньої межі шкали. Амперметр класу 2,5 зі шкалою до 500 А дає похибку до 12,5 А на будь-якій позначці, і при вимірюванні струму 80 А така похибка становить уже понад 15 % — тому прилад підбирають так, щоб робоче значення лежало у верхній третині шкали.

Конкретні засоби вимірювання зварника: універсальний шаблон зварника УШС-3 для катета шва й кута розкриття кромок, штангенциркуль для товщини металу й діаметра електрода, набір щупів для зазору в стику, магнітний кутник для складання під прямим кутом, термокрейда й контактний термометр для контролю температури попереднього підігріву, редуктор з манометрами для тиску в балоні й на виході, ротаметр для витрати захисного газу.

Результат вимірювання записують із кількістю значущих цифр, що відповідає точності приладу. Катет шва, виміряний шаблоном із ціною поділки 0,5 мм, не може бути записаний як 6,37 мм — правильний запис 6,5 мм. Зайві цифри створюють видимість точності, якої немає.

Ключові формули

- Абсолютна похибка: $\Delta x = |x_{\text{вим}} - x_{\text{справж}}|$
- Відносна похибка: $\delta = (\Delta x / x) \cdot 100 \%$
- Похибка приладу за класом точності: $\Delta = (K \cdot x_{\text{макс}}) / 100$
- Похибка непрямого вимірювання (добуток/частка): $\delta_{\text{результ}} = \delta_1 + \delta_2 + \dots$
- Середнє значення при багаторазовому вимірюванні: $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$

Питання для самоконтролю

1. Зварювальний струм 120 А виміряно амперметром класу точності 2,5 зі шкалою до 600 А. Яка абсолютна й відносна похибка вимірювання?
2. Чому погонна енергія є результатом непрямого вимірювання і як накопичується її похибка?
3. Чому катет шва, виміряний шаблоном УШС-3, не можна записувати з точністю до сотих часток міліметра?

ЛЕКЦІЯ 2

КІНЕМАТИКА ТА ДИНАМІКА. ЗАКОНИ НЬЮТОНА. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

План лекції

1. Механічний рух. Швидкість і прискорення.
2. Закони Ньютона.
3. Сили в механіці: тяжіння, пружності, тертя.
4. Рівномірний рух у зварювальному обладнанні.

1. Механічний рух

Механічний рух — зміна положення тіла відносно інших тіл із часом. Для опису руху потрібна система відліку: тіло відліку, система координат і годинник.

Швидкість характеризує швидкість зміни положення, прискорення — швидкість зміни швидкості. При рівномірному прямолінійному русі прискорення дорівнює нулю, шлях прямо пропорційний часу.

Саме рівномірний рух є основним режимом роботи зварювального обладнання. Швидкість зварювання, швидкість подавання електродного дроту, швидкість переміщення каретки автомата — усі вони задаються постійними, і будь-яке відхилення від сталості одразу відбивається на формі шва.

2. Закони Ньютона

Перший закон: тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо рівнодійна прикладених сил дорівнює нулю. Каретка зварювального трактора рухається рівномірно тоді, коли сила тяги двигуна точно врівноважує тертя.

Другий закон: прискорення прямо пропорційне рівнодійній сил і обернено пропорційне масі. Це основне рівняння динаміки, з нього виводять розрахунок приводів, гальм і механізмів подавання.

Третій закон: сили взаємодії двох тіл рівні за модулем і протилежні за напрямом. Ролик подавального механізму тисне на дріт, дріт із такою самою силою тисне на ролик — саме ця сила створює тертя, яке й проштовхує дріт у пальник.

3. Сили в механіці

Сила тяжіння пропорційна масі тіла і прискоренню вільного падіння, яке становить приблизно $9,8 \text{ м/с}^2$. Через неї виникає прогин балки між опорами і навантаження на стропи при підйманні звареної конструкції.

Сила пружності виникає при деформації й за законом Гука пропорційна її величині. На ній базується робота притискних пружин подавального механізму, струбцин і механічних складальних пристроїв.

Сила тертя ковзання пропорційна силі нормального тиску з коефіцієнтом тертя, що залежить від пари матеріалів і стану поверхонь. У зварювальному виробництві тертя одночасно корисне й шкідливе: воно передає рух дроту в подавальному механізмі, але воно ж створює опір у напрямному каналі пальника. Забруднений або зім'ятий канал збільшує тертя настільки, що дріт починає подаватися ривками, дуга горить нестабільно, а шов виходить із напливами. Це найчастіша причина «незрозумілої» нестабільності при напівавтоматичному зварюванні.

4. Рівномірний рух і якість шва

Швидкість зварювання безпосередньо визначає кількість теплоти, що припадає на одиницю довжини шва. Якщо швидкість зросте вдвічі при незмінному струмі, погонна енергія зменшиться вдвічі, ванна буде меншою, глибина проплавлення — меншою, і можливий непровар. Якщо швидкість впаде — з'явиться перегрів, підвищене жолоблення і напливи.

Тому зварювальні автомати й трактори будують так, щоб швидкість не залежала від навантаження: використовують редуктори з великим передатним числом і двигуни з жорсткою механічною характеристикою. Ручне зварювання цієї стабільності не має, і саме через це шов, виконаний вручну, завжди має більший розкид розмірів, ніж автоматичний.

Швидкість подавання дроту пов'язана зі струмом: чим більша швидкість подавання, тим більший струм устанавлюється в колі при саморегулюванні дуги. Це взаємозв'язок, до якого ми повернемося в лекції про електричну дугу.

Ключові формули

- Швидкість рівномірного руху: $v = s / t$
- Прискорення: $a = (v - v_0) / t$
- Другий закон Ньютона: $F = m \cdot a$
- Сила тяжіння: $F_t = m \cdot g$, $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$
- Сила тертя ковзання: $F_{\text{тер}} = \mu \cdot N$
- Швидкість зварювання: $v_{\text{зв}} = L / t$, зазвичай у м/год або см/хв

Питання для самоконтролю

1. Каретка зварювального автомата проходить шов довжиною 1,2 м за 4 хвилини. Яка швидкість зварювання в м/год?
2. Чому забруднений напрямний канал пальника призводить до нестабільного горіння дуги?
3. Що станеться з глибиною проплавлення, якщо збільшити швидкість зварювання при незмінному струмі, і чому?

ЛЕКЦІЯ 3

ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ, ККД

План лекції

1. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу.
2. Механічна робота й потужність.
3. Енергія. Закон збереження й перетворення енергії.
4. Коефіцієнт корисної дії зварювального процесу.

1. Імпульс і закон його збереження

Імпульс — добуток маси тіла на його швидкість, величина векторна. У замкненій системі сумарний імпульс не змінюється.

У зварюванні закон збереження імпульсу пояснює перенесення металу через дугу. Крапля, що відривається від торця електрода, набуває швидкості під дією електродинамічних сил і сили тяжіння та переносить свій імпульс у ванну. При струменевому перенесенні краплі дрібні й

швидкі, при крупнокрапельному — великі й повільні; саме тому струменеве перенесення дає гладкий шов і мале розбризкування, а крупнокрапельне — грубий валик і бризки. Віддача проявляється й безпосередньо: реактивна сила струменя плазми та газів, що випаровуються, відштовхує краплю від ванни і в певних режимах виштовхує метал із зони шва. Це одна з причин розбризкування при зварюванні в вуглекислому газі.

2. Робота й потужність

Механічна робота дорівнює добутку сили на переміщення в напрямі дії сили. Потужність — робота за одиницю часу.

Для зварювального процесу основною є не механічна, а електрична потужність: добуток напруги на дузі та зварювального струму. Саме вона перетворюється на теплоту в дузі.

Тут важливо не сплутати три різні потужності. Споживана з мережі потужність джерела живлення більша за потужність дуги — частина витрачається на втрати в трансформаторі й випрямлячі. Потужність дуги більша за корисну теплову потужність, що надходить у виріб, — частина розсіюється випромінюванням і газами. Корисна потужність більша за ту, що йде власне на плавлення, — частина відводиться в основний метал.

3. Енергія та закон її збереження

Енергія — міра здатності системи виконати роботу. Механічна енергія буває кінетичною і потенціальною, і при відсутності тертя їхня сума зберігається.

Закон збереження й перетворення енергії є загальним: енергія не виникає й не зникає, а переходить з однієї форми в іншу. У зварювальному колі ланцюжок перетворень такий: електрична енергія мережі — електрична енергія зварювального кола — теплова енергія дуги — теплота плавлення металу й теплота, відведена в деталь, — а частково й світлова та звукова енергія, які ми сприймаємо як яскраве світіння та тріск дуги.

Наявність побічних форм означає, що ККД не може дорівнювати одиниці. Світло дуги — це не «додатковий бонус», а пряма втрата енергії, за яку ще й доводиться платити засобами захисту очей.

4. ККД зварювального процесу

Коефіцієнт корисної дії — відношення корисно використаної енергії до затраченої, завжди менший за одиницю.

Ефективний ККД нагрівання виробу дугою показує, яка частка потужності дуги передалася металу. Він істотно залежить від способу: при ручному дуговому зварюванні покритим електродом становить приблизно 0,7–0,8, при зварюванні під флюсом досягає 0,85–0,9, оскільки флюс і шлак утримують теплоту, при зварюванні в аргоні неплавким електродом знижується до 0,5–0,6, бо значна частина енергії йде на нагрівання й винесення захисного газу.

Термічний ККД проплавлення ще менший: він показує, яка частка підведеної до виробу теплоти пішла саме на розплавлення металу шва, а не на нагрівання решти деталі. Він рідко перевищує 0,3.

Практичний висновок простий: вибираючи спосіб зварювання, технолог вибирає і ціну виробу в кіловат-годинах. Зварювання під флюсом економічніше не тільки через продуктивність, а й через вищий ККД.

Ключові формули

- Імпульс: $p = m \cdot v$
- Робота: $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$
- Потужність механічна: $N = A / t$
- Потужність дуги: $P_d = U_d \cdot I_{зв}$
- ККД: $\eta = A_{корисна} / A_{затрачена}$
- Погонна енергія: $q_p = (U_d \cdot I_{зв} \cdot \eta) / v_{зв}$

Питання для самоконтролю

1. Дуга горить при напрузі 24 В і струмі 180 А. Яка потужність дуги? Скільки енергії виділиться за 5 хвилин безперервного горіння?
2. Чому ефективний ККД при зварюванні під флюсом вищий, ніж при аргонодуговому?

3. Чому струменеве перенесення металу дає менше розбризкування, ніж крупнокрапельне?

ЛЕКЦІЯ 4

ТИСК. ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ ТА ГІДРОДИНАМІКИ. РІВНЯННЯ НЕРОЗРИВНОСТІ

План лекції

1. Тиск. Закон Паскаля. Гідравлічний прес.
2. Тиск газу в балоні. Робота редуктора.
3. Рух газу. Рівняння нерозривності та рівняння Бернуллі.
4. Витрата захисного газу й формування газового захисту.

1. Тиск і закон Паскаля

Тиск — сила, що діє перпендикулярно до поверхні, віднесена до площі цієї поверхні. Одиниця — паскаль; на виробництві користуються мегапаскалем, бар і технічною атмосферою.

Закон Паскаля: тиск, створений у рідині або газі, передається в усі боки без зміни. На ньому побудовані гідравлічні системи: сила на великому поршні у стільки разів більша за силу на малому, у скільки разів більша його площа.

Для вашої спеціальності це основа роботи гідравлічних пресів для гнуття й правки листа, гідравлічних приводів затискачів у складально-зварювальних пристроях, домкратів і преса для правки жолоблення звареної конструкції. Виграш у силі супроводжується програшем у переміщенні: великий поршень проходить рівно у стільки ж разів менший шлях.

2. Тиск газу в балоні й редуктор

Тиск газу створюється ударами молекул об стінки посудини. Наповнений балон з аргоном або киснем має тиск близько 15 МПа (150 бар), балон з вуглекислотою — близько 5–6 МПа, причому в останньому випадку тиск визначається не кількістю газу, а температурою, бо вуглекислота в балоні перебуває в зрідженому стані.

Це принципова відмінність, яку треба розуміти. За манометром на аргоновому балоні можна визначити залишок газу: тиск падає пропорційно витраті. За манометром на вуглекислотному балоні залишок визначити не можна доти, доки в балоні є рідка фаза, — тиск залишається майже сталим і починає падати лише в кінці.

Редуктор знижує високий тиск балона до робочого. Він має два манометри: високого тиску — показує тиск у балоні, низького — робочий тиск на виході. Принцип роботи заснований на рівновазі сил, що діють на мембрану: тиску газу знизу та зусилля регулювальної пружини зверху. Щойно тиск на виході зростає, мембрана прогинається й прикриває клапан.

При великій витраті вуглекислоти редуктор охолоджується і може замерзнути, бо розширення газу супроводжується зниженням температури. Саме тому для CO₂ застосовують підігрівники газу.

3. Рівняння нерозривності та Бернуллі

Для потоку в трубі змінного перерізу добуток площі перерізу на швидкість сталий: де переріз вужчий, там швидкість більша.

Рівняння Бернуллі пов'язує тиск і швидкість: у місцях, де швидкість потоку більша, статичний тиск менший. Це не парадокс, а наслідок закону збереження енергії — частина енергії тиску перетворюється на кінетичну.

Наслідок безпосередньо стосується зварювального пальника. У звужувальному соплі струмінь розганяється, і тиск у ньому падає нижче атмосферного; якщо швидкість завелика, струмінь починає підсмоктувати навколишнє повітря і затягувати в зону зварювання азот і кисень. Замість захисту виходить забруднення.

4. Витрата захисного газу

Витрата захисного газу вимірюється в літрах за хвилину і встановлюється ротаметром. Типові значення: 8–12 л/хв для зварювання в вуглекислому газі дротом 1,2 мм, 6–10 л/хв для аргонодугового зварювання неплавким електродом, більше — при зварюванні на протязі або великих струмах.

Помилковим є уявлення, що «чим більше газу, тим краще захист». Занижена витрата не створює суцільного захисного шару, метал окиснюється й насичується азотом, шов виходить поруватим. Завищена витрата спричиняє турбулентність струменя, і той сам підмішує повітря — пори з'являються з тієї самої причини, що й при заниженій витраті.

Правильний газовий захист — це ламінарний, а не турбулентний струмінь. Тому в сопла встановлюють сітки-розсікачі, стежать за концентричністю сопла й мундштука та за видаленням бризок із внутрішньої поверхні сопла: приварена бризка руйнує ламінарність не гірше, ніж завищена витрата.

Ключові формули

- Тиск: $p = F / S$
- Гідростатичний тиск стовпа рідини: $p = \rho \cdot g \cdot h$
- Гідравлічний прес: $F_1 / S_1 = F_2 / S_2$
- Рівняння нерозривності: $S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$
- Рівняння Бернуллі: $p + \rho v^2 / 2 + \rho gh = \text{const}$
- Переведення: $1 \text{ МПа} \approx 10 \text{ бар} \approx 10,2 \text{ кгс/см}^2$

Питання для самоконтролю

1. Манометр редуктора показує 12 МПа. Виразить цей тиск у барах і в кгс/см².
2. Чому за манометром високого тиску не можна визначити залишок вуглекислоти в балоні?
3. Чому і занижена, і завищена витрата захисного газу призводять до пор у шві?

ЛЕКЦІЯ 5

МЕХАНІКА ДЕФОРМІВНОГО ТІЛА. НАПРУЖЕННЯ, ЗАКОН ГУКА, ГРАНИЦЯ МІЦНОСТІ

План лекції

1. Види деформацій твердого тіла.
2. Механічне напруження та відносна деформація.
3. Закон Гука. Модуль Юнга. Діаграма розтягу.
4. Напруження у зварних з'єднаннях. Концентратори.

1. Види деформацій

Деформація — зміна форми або розмірів тіла під дією сил. Розрізняють розтяг, стиск, зсув, згин і кручення; у реальних конструкціях вони поєднуються.

Для зварних конструкцій кожен вид має конкретний прояв. Розтяг — стиковий шов балки, навантаженої на розтяг, і елементи ферм. Стиск — стійки та опорні вузли. Зсув — кутові шви, які практично завжди працюють на зріз. Згин — зварена двотаврова балка під навантаженням. Кручення — вал, привареними до якого є фланці.

Деформація пружна, якщо після зняття навантаження тіло повністю відновлює форму, і пластична, якщо залишається залишкова зміна. Конструкції розраховують так, щоб робочі деформації лишалися в пружній області, але зварювальні деформації — це саме пластичні деформації, що виникають у процесі виготовлення.

2. Напруження та відносна деформація

Механічне напруження — внутрішня сила, віднесена до площі перерізу. Одиниця та сама, що й у тиску, — паскаль, на практиці мегапаскаль.

Саме напруження, а не сила, визначає, чи витримає деталь. Однакова сила, прикладена до тонкого і товстого елемента, дає різні напруження, і руйнується той, у якому напруження перевищило допустиме.

Звідси розрахунок кутового шва: несуча здатність визначається площею небезпечного перерізу, а вона дорівнює добутку розрахункової висоти шва на його довжину. Розрахункова висота приблизно дорівнює 0,7 катета. Тому збільшення катета з 5 до 7 мм додає до міцності шва близько 40 %, а не 40 % маси наплавленого металу — маса при цьому зростає майже вдвічі. Надмірний катет — класична форма перевитрати електродів без виграшу в надійності.

3. Закон Гука, модуль Юнга, діаграма розтягу

Закон Гука: у пружній області напруження прямо пропорційне відносній деформації. Коефіцієнтом пропорційності є модуль Юнга — характеристика жорсткості матеріалу.

Для сталі модуль Юнга становить близько 200 ГПа, для міді приблизно 110 ГПа, для алюмінію близько 70 ГПа. Що більший модуль, то менше деформується матеріал під тим самим навантаженням. Модуль Юнга не слід плутати з міцністю: чавун має високий модуль, але крихкий.

Діаграма розтягу показує залежність напруження від відносної деформації. На ній виділяють границю пружності, границю текучості й границю міцності. Для маловуглецевої сталі Ст3 границя текучості становить близько 245 МПа, границя міцності — 370–480 МПа. Робочі напруження приймають із запасом відносно границі текучості, зазвичай у межах від півтора до трьох.

Важлива для зварника обставина: метал шва й зона термічного впливу мають інші механічні властивості, ніж основний метал. Метал шва зазвичай міцніший, але менш пластичний, а в зоні термічного впливу може утворитися загартована ділянка з різко зниженою ударною в'язкістю. Саме тому руйнування зварної конструкції найчастіше проходить не по шву, а по лінії сплавлення.

4. Напруження у зварних з'єднаннях і концентратори

При зварюванні нагрітий метал розширюється, а холодний навколишній не дає йому розширитися вільно. При охолодженні шов прагне скоротитися, а навколишній метал знову не дає. Результат — залишкові напруження, які в шві часто досягають границі текучості, і залишкові деформації конструкції.

На ці залишкові напруження накладаються робочі. Якщо в зоні шва є концентратор — підріз, непровар, шлакове включення, різкий перехід від шва до основного металу, — місцеве напруження біля нього може у кілька разів перевищувати середнє. Концентратор не зменшує міцність матеріалу, він перерозподіляє напруження так, що біля вершини дефекту вони різко зростають.

Звідси всі технологічні правила, які ви вивчатимете далі: плавний перехід від шва до основного металу, механічне зачищення підрізів, заборона на різкі кутові переходи в конструкції, зменшення жорсткості закріплення при складанні, зварювання зворотноступінчастим способом, попередній підігрів для товстих деталей і термічна обробка для зняття залишкових напружень.

При змінних навантаженнях роль концентраторів ще більша: втомне руйнування практично завжди починається від концентратора, навіть коли статичної міцності вистачало з великим запасом.

Ключові формули

- Механічне напруження: $\sigma = F / S$
- Відносна деформація: $\varepsilon = \Delta l / l_0$
- Закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, звідки $\Delta l = F \cdot l_0 / (E \cdot S)$
- Модуль Юнга сталі: $E \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ Па} = 200 \text{ ГПа}$
- Напруження зрізу в кутовому шві: $\tau = F / (0,7 \cdot k \cdot l)$
- Запас міцності: $n = \sigma_{\text{гран}} / \sigma_{\text{роб}}$

Питання для самоконтролю

1. Кутовий шов із катетом 6 мм і довжиною 200 мм навантажений силою 80 кН. Яке напруження зрізу в небезпечному перерізі?
2. Чому руйнування зварної конструкції найчастіше проходить по лінії сплавлення, а не по металу шва?
3. Чому підріз небезпечніший при змінному навантаженні, ніж при постійному?

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. Модель ідеального газу. Основне рівняння МКТ.
3. Газові закони. Рівняння Клапейрона — Менделєєва.
4. Захисні гази та розрахунок запасу балона.

1. Положення МКТ

Молекулярно-кінетична теорія стоїть на трьох положеннях: речовина складається з частинок, частинки перебувають у безперервному хаотичному русі, частинки взаємодіють між собою.

Температура є мірою середньої кінетичної енергії хаотичного руху частинок. Це визначення важливіше за побутове «міра нагрітості»: воно пояснює, чому при нагріванні газу в закритому балоні зростає тиск, і чому абсолютний нуль недосяжний.

Абсолютна шкала температур відлічується від абсолютного нуля: $T(K) = t(^{\circ}C) + 273$. У всіх газових розрахунках використовується тільки абсолютна температура; підстановка градусів Цельсія — найчастіша помилка в задачах цього розділу.

2. Ідеальний газ

Ідеальний газ — модель, у якій нехтують розмірами молекул і силами притягання між ними, враховуючи лише пружні удари. Реальні захисні гази — аргон, вуглекислий газ, гелій, кисень — при кімнатній температурі й помірних тисках поведуться близько до ідеального.

Межі моделі видно на прикладі вуглекислоти: при тиску понад 5–6 МПа й кімнатній температурі вона скраплюється, і модель ідеального газу до неї вже не застосовна. Аргон за тих самих умов лишається газом, тому балон з аргоном підпорядковується газовим законам, а балон з CO_2 — ні. Тиск газу за основним рівнянням МКТ пропорційний концентрації молекул і середній кінетичній енергії їхнього руху. Звідси впливають усі газові закони.

3. Газові закони

Ізотермічний процес (закон Бойля — Маріотта): при сталій температурі добуток тиску на об'єм сталий. Ізобарний (закон Гей-Люссака): при сталому тиску об'єм пропорційний абсолютній температурі. Ізохорний (закон Шарля): при сталому об'ємі тиск пропорційний абсолютній температурі.

Об'єднаний газовий закон пов'язує всі три параметри, а рівняння Клапейрона — Менделєєва додає до них кількість речовини.

Ізохорний процес має пряме значення для техніки безпеки. Балон — посудина сталого об'єму. Нагрівання балона з аргоном від 20 до 60 $^{\circ}C$ піднімає тиск приблизно на 14 %, і це ще в межах запасу міцності; нагрівання відкритим полум'ям або пряме сонячне опромінення влітку може вивести тиск за допустимий. Звідси вимога зберігати балони в затінку, не ближче ніж за метр від опалювальних приладів і за п'ять метрів від відкритого вогню.

4. Захисні гази та запас балона

Стандартний балон має водяну місткість 40 л. При тиску 15 МПа він містить приблизно 6 m^3 аргону, приведенного до нормальних умов: об'єм газу дорівнює добутку місткості балона на відношення тиску в балоні до атмосферного.

Знаючи витрату, легко оцінити час роботи. При витраті 10 л/хв повний балон аргону забезпечує близько 600 хвилин, тобто приблизно 10 годин чистого часу горіння дуги. Практично слід зупинятися при залишковому тиску 0,5 МПа: повністю спорожнений балон набирає вологого повітря, а це призводить до пор у наступних швах.

Балон із вуглекислотою заповнюють за масою, а не за тиском: у стандартний 40-літровий балон заливають 25 кг CO_2 , що дає близько 12,5 m^3 газу. Ця обставина ще раз підкреслює різницю між газом і зрідженим газом.

Аргон важчий за повітря приблизно в 1,4 раза, вуглекислий газ — у 1,5 раза, гелій легший у 7 разів. Тому аргон і CO_2 накопичуються в приямках, колодязях і всередині ємностей, витісняючи повітря. Зварювання всередині замкнених об'ємів без примусової вентиляції — пряма загроза задушення, і причина тут суто фізична: густина газу.

Ключові формули

- Абсолютна температура: $T = t + 273 \text{ K}$
- Закон Бойля — Маріотта: $p_1 V_1 = p_2 V_2$ ($T = \text{const}$)
- Закон Гей-Люссака: $V_1/T_1 = V_2/T_2$ ($p = \text{const}$)
- Закон Шарля: $p_1/T_1 = p_2/T_2$ ($V = \text{const}$)
- Об'єднаний закон: $p_1 V_1/T_1 = p_2 V_2/T_2$
- Рівняння Клапейрона — Менделєєва: $pV = (m/M) \cdot R \cdot T$, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$
- Запас газу в балоні: $V_0 = V_{\text{бал}} \cdot p / p_0$

Питання для самоконтролю

1. Балон місткістю 40 л заповнений аргоном під тиском 14,7 МПа. Скільки кубометрів газу він містить при нормальному атмосферному тиску?
2. Балон нагріли від 15 до 55 °С. На скільки відсотків зросте тиск у ньому?
3. Чому аргон і вуглекислий газ становлять небезпеку при зварюванні всередині резервуара, а гелій — меншою мірою?

ЛЕКЦІЯ 7

ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОЄМНІСТЬ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

План лекції

1. Внутрішня енергія та способи її зміни.
2. Кількість теплоти. Питома теплоємність.
3. Перший закон термодинаміки.
4. Тепловий розрахунок нагрівання деталі при зварюванні.

1. Внутрішня енергія

Внутрішня енергія тіла — сумарна енергія хаотичного руху й взаємодії його частинок. Вона залежить від температури, маси та агрегатного стану тіла, але не залежить від того, як тіло в цей стан потрапило.

Змінити внутрішню енергію можна двома способами: виконанням роботи над тілом і теплопередачею. У зварюванні працюють обидва: дуга передає теплоту, а при зварюванні тертям і ультразвуковому зварюванні внутрішня енергія зростає саме за рахунок роботи.

Показовий приклад — зварювання тертям з перемішуванням: жоден зовнішній нагрівник не застосовується, метал переходить у пластичний стан лише за рахунок механічної роботи інструмента.

2. Кількість теплоти й теплоємність

Кількість теплоти, потрібна для нагрівання тіла, пропорційна масі, питомій теплоємності й зміні температури.

Питома теплоємність сталі становить близько 460 Дж/(кг·K), алюмінію — 920, міді — 385. Алюміній потребує вдвічі більше теплоти на градус, ніж сталь, і це одна з причин, чому алюмінієві конструкції зварюють на підвищених струмах або з попереднім підігрівом.

Але теплоємність — лише половина картини. Друга половина — теплопровідність, яку розглянемо в лекції 9. Мідь має найменшу з трьох теплоємність і найбільшу теплопровідність, тому теплота від дуги миттєво розтікається по деталі, і зварювання міді вимагає найпотужніших джерел.

3. Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки — це закон збереження енергії для теплових процесів: підведена до системи теплота йде на зміну її внутрішньої енергії та на виконання нею роботи.

Для ізохорного процесу вся теплота йде на зміну внутрішньої енергії, для ізобарного частина витрачається на роботу розширення, для ізотермічного вся теплота перетворюється на роботу.

Адіабатний процес відбувається без теплообміну: газ, що швидко розширюється, охолоджується. Саме адіабатне розширення пояснює обмерзання вуглекислотного редуктора: газ, розширюючись від 5 МПа до 0,15 МПа, виконує роботу за рахунок власної внутрішньої енергії й різко охолоджується. Підігрівник газу компенсує цю втрату.

4. Тепловий розрахунок при зварюванні

Теплота, введена дугою, розподіляється між металом шва, зоною термічного впливу, рештою деталі та втратами. Для оцінних розрахунків користуються поняттям погонної енергії — енергії на одиницю довжини шва.

Практичний приклад: при напрузі 26 В, струмі 200 А, швидкості зварювання 20 см/хв і ефективному ККД 0,8 погонна енергія становить приблизно 12,5 кДж/см. Знаючи погонну енергію, можна оцінити ширину зони термічного впливу, швидкість охолодження шва та потребу в попередньому підігріві.

Зворотний бік: якщо потрібно нагріти стикову пластину масою 12 кг зі сталі від 20 до 150 °С для попереднього підігріву, необхідна теплота становить приблизно 720 кДж — це майже 0,2 кВт·год, і саме на таку енергію слід розраховувати газовий пальник або індуктор підігріву, додавши втрати на розсіювання.

Ключові формули

– Кількість теплоти при нагріванні: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

– Питома теплоємність сталі: $c \approx 460 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

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

– Робота газу при ізобарному процесі: $A = p \cdot \Delta V$

– Погонна енергія: $q_p = (U_d \cdot I_{зв} \cdot \eta) / v_{зв}$

– Зв'язок одиниць: 1 кВт·год = 3,6 МДж

Питання для самоконтролю

1. Скільки теплоти потрібно для підігріву сталевих деталей масою 25 кг від 20 до 200 °С?
2. Чому вуглекислотний редуктор обмерзає при великій витраті газу?
3. Порівняйте кількість теплоти, потрібну для нагрівання на 100 °С однакових за масою деталей зі сталі та з алюмінію.

ЛЕКЦІЯ 8

ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ТЕПЛОВІ МАШИНИ. КОМПРЕСОРИ ТА ХОЛОДИЛЬНІ ЦИКЛИ

План лекції

1. Оборотні й необоротні процеси. Другий закон термодинаміки.
2. Теплові двигуни. Цикл Карно.
3. Холодильна машина й тепловий насос.
4. Компресорне господарство зварювальної ділянки.

1. Необоротність і другий закон

Усі реальні теплові процеси необоротні. Теплота самочинно переходить від гарячого тіла до холодного й ніколи навпаки; зварна деталь остигає до температури цеху, але ніколи не нагрівається за рахунок охолодження повітря.

Другий закон термодинаміки формулюють по-різному, але зміст один: неможливо побудувати машину, яка перетворювала б теплоту на роботу повністю, без передавання частини теплоти холодильнику. Перший закон забороняє вічний двигун першого роду, другий — другого роду.

Мірою необоротності є ентропія: у замкненій системі вона не зменшується. Для практики це означає, що якість енергії деградує: електрична енергія повністю перетворюється на теплоту дуги, а теплота на електрику — лише частково.

2. Теплові двигуни й цикл Карно

Тепловий двигун отримує теплоту від нагрівника, частину перетворює на роботу, решту віддає холодильнику. ККД дорівнює відношенню роботи до підведеної теплоти.

Цикл Карно дає максимально можливий ККД, який залежить тільки від температур нагрівника й холодильника. Це верхня межа, недосяжна на практиці.

Для вашої спеціальності теплові двигуни важливі як джерело живлення в польових умовах: зварювальний агрегат із дизельним двигуном застосовують там, де немає мережі, — на трасах

трубопроводів, монтажних майданчиків, у полі. Його ККД становить близько 30–35 %, і саме тому витрата палива на кілограм наплавленого металу тут набагато вища, ніж у цеху.

3. Холодильна машина й тепловий насос

Холодильна машина — тепловий двигун, що працює у зворотному напрямі: за рахунок зовнішньої роботи вона переносить теплоту від холодного тіла до гарячого. Другому закону це не суперечить, бо процес не самочинний.

У зварювальному виробництві холодильні цикли трапляються у двох місцях. Перше — осушувачі стисненого повітря: повітря охолоджують, волога конденсується й видаляється, після чого повітря знову підігрівають. Друге — установки водяного охолодження пальників для зварювання на великих струмах, де тепловідведення необхідне для роботи ТІГ-пальників і плазмотронів.

4. Компресорне господарство

Компресор стискає повітря, виконуючи над ним роботу, тому повітря нагрівається. Після компресора воно проходить через холодильник і вологовідділювач.

Питання вологи є критичним. Стиснене повітря використовують для повітряно-плазмового різання, для пневматичних затискачів і для продування. Атмосферне повітря завжди містить водяну пару; при стисканні в 8 разів парціальний тиск пари зростає у 8 разів, і частина її неминуче конденсується. Якщо цю вологу не видалити, вона потрапить у плазмотрон, спричинить нестабільне горіння дуги, прискорене руйнування сопла й катода, а на розрізі з'явиться грат.

Тому лінія стисненого повітря для плазмового різання завжди включає ресивер, вологовідділювач і фільтр, а точку роси стисненого повітря нормують. До поняття точки роси ми повернемося в лекції 11.

Ключові формули

- ККД теплового двигуна: $\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1$
- ККД циклу Карно: $\eta_{\text{max}} = (T_1 - T_2) / T_1$
- Холодильний коефіцієнт: $\varepsilon = Q_2 / A$
- Робота при адіабатному процесі: $A = -\Delta U$
- Ступінь стиснення компресора: $\varepsilon = p_2 / p_1$

Питання для самоконтролю

1. Дизельний зварювальний агрегат має ККД 32 %. Скільки теплоти від згоряння палива витрачається марно на кожну кіловат-годину виробленої електроенергії?
2. Чому стиснене повітря обов'язково осушують перед подаванням у плазмотрон?
3. Чому холодильна машина не суперечить другому закону термодинаміки?

ЛЕКЦІЯ 9

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА: ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, КОНВЕКЦІЯ, ВИПРОМІНЮВАННЯ. ТЕРМІЧНИЙ ОПІР

План лекції

1. Три види теплопередачі.
2. Теплопровідність. Закон Фур'є.
3. Конвекція та випромінювання.
4. Тепловідведення при зварюванні й швидкість охолодження шва.

1. Три види теплопередачі

Теплопровідність — передавання теплоти через речовину без переносу самої речовини. Конвекція — перенесення теплоти разом із потоком рідини або газу. Випромінювання — перенесення енергії електромагнітними хвилями, для якого середовище взагалі не потрібне.

У зварюванні діють усі три одночасно: теплота від ванни відводиться в деталь теплопровідністю, від поверхні деталі в цех — конвекцією й випромінюванням, а сама дуга нагріває виріб переважно випромінюванням і потоком заряджених частинок.

2. Теплопровідність і закон Фур'є

Тепловий потік через шар матеріалу пропорційний коефіцієнту теплопровідності, площі й перепаду температур і обернено пропорційний товщині шару.

Коефіцієнт теплопровідності сталі становить близько 45 Вт/(м·К), нержавної сталі — лише 15, алюмінію — 220, міді — 400. Різниця у понад 25 разів між нержавною сталлю та міддю повністю визначає різницю в технології їх зварювання.

Аустенітна нержавна сталь погано проводить теплоту, тому теплота концентрується в зоні шва; при тому самому струмі ванна більша, проплавлення глибше, а жолоблення сильніше, ніж у вуглецевої сталі. Мідь і алюміній, навпаки, миттєво відводять теплоту від зони зварювання, і для них потрібні або підвищені струми, або попередній підігрів.

3. Конвекція та випромінювання

Конвекція буває природною, коли рух виникає через різницю густин нагрітого й холодного газу, і вимушеною, коли потік створює вентилятор. Саме природною конвекцією остигає зварена конструкція в цеху; саме вимушеною працює обдування радіатора зварювального інвертора.

Протяг у цеху — це вимушена конвекція, і саме тому він шкідливий одразу з двох причин: здуває захисний газ і різко прискорює охолодження шва.

Випромінювання описується законом Стефана — Больцмана: потік енергії пропорційний четвертому степеню абсолютної температури. Через четвертий степінь роль випромінювання при низьких температурах мала, а при температурі зварювальної ванни — визначальна. Дуга з температурою близько 6000 К випромінює настільки інтенсивно, що незахищена шкіра отримує опік за десятки секунд.

4. Тепловідведення й швидкість охолодження шва

Швидкість охолодження шва — ключовий технологічний параметр. Вона визначає структуру металу шва й зони термічного впливу: при повільному охолодженні утворюється пластичний перліт, при швидкому — крихкий мартенсит, що й спричиняє холодні тріщини.

Швидкість охолодження зростає зі збільшенням товщини металу, з переходом від стикового з'єднання до таврового й хрестоподібного, зі зниженням температури довкілля та зі зменшенням погонної енергії.

Звідси всі практичні заходи. Попередній підігрів зменшує перепад температур і сповільнює охолодження. Збільшення погонної енергії діє так само. Заборона зварювання на морозі без підігріву й вимога закривати виріб від протягу мають ту саму фізичну природу.

Товщина деталі має особливе значення: при зварюванні тонкого листа теплота відводиться практично у двох напрямках, при зварюванні товстої плити — у трьох, тому плита остигає значно швидше. Саме тому вимоги до підігріву прив'язують до товщини, а не лише до марки сталі.

Ключові формули

– Закон Фур'є: $Q = \lambda \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \cdot t / d$

– Тепловий потік: $q = Q / t$

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

– Закон Стефана — Больцмана: $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)

– Теплопровідність: сталь 45, нержавна сталь 15, алюміній 220, мідь 400 Вт/(м·К)

Питання для самоконтролю

1. Чому при однакових режимах ванна при зварюванні нержавної сталі більша, ніж при зварюванні маловуглецевої?
2. Чому протяг у цеху погіршує якість шва одразу з двох причин?
3. Як зміниться швидкість охолодження шва при переході від стикового з'єднання листів 6 мм до таврового з'єднання плит 25 мм?

ЛЕКЦІЯ 10

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ. ПЛАВЛЕННЯ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, ВИПАРОВУВАННЯ. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ

План лекції

1. Агрегатні стани й фазові переходи.
2. Плавлення та кристалізація. Питома теплота плавлення.
3. Випаровування та кипіння. Угар легувальних елементів.

4. Поверхневий натяг і формування зварювальної ванни.

1. Фазові переходи

Фазовий перехід — зміна агрегатного стану речовини. Плавлення й кристалізація, випаровування й конденсація, сублімація й десублімація — три пари взаємно протилежних процесів.

Головна особливість фазового переходу: він відбувається при сталій температурі. Поки триває плавлення, підведена теплота йде не на нагрівання, а на руйнування кристалічних ґраток. Саме тому температура зварювальної ванни на межі з твердим металом залишається рівною температурі плавлення, скільки б теплоти не підводила дуга.

Температура плавлення заліза — 1539 °С, сталі — приблизно 1450–1520 °С залежно від складу, алюмінію — 660 °С, міді — 1083 °С, вольфраму — 3410 °С. Висока температура плавлення вольфраму і є причиною, чому саме з нього роблять неплавкі електроди для аргонодугового зварювання.

2. Плавлення й кристалізація

Питома теплота плавлення сталі становить приблизно 270 кДж/кг. Це означає, що на розплавлення кілограма сталі, вже нагрітої до температури плавлення, треба стільки ж енергії, скільки на нагрівання того самого кілограма приблизно на 590 градусів.

Звідси видно структуру енергетичних витрат при зварюванні: значна частина теплоти витрачається не на нагрівання, а на сам фазовий перехід. Для алюмінію ситуація ще різкіша: питома теплота плавлення близько 390 кДж/кг при вдвічі нижчій температурі плавлення. Алюміній переходить від твердого стану до рідкого без помітної зміни кольору, тому візуально вловити момент утворення ванни важко — це відома складність при зварюванні алюмінію.

Кристалізація зварювальної ванни йде від країв до центру, від холодніших ділянок до гарячіших. Кристали ростуть назустріч один одному, і в центрі шва збираються останні порції рідкого металу, збагачені домішками — сіркою, фосфором, газами. Саме тому гарячі тріщини й ліквації зосереджені по осі шва.

3. Випаровування й угар елементів

Випаровування відбувається з поверхні рідини при будь-якій температурі, кипіння — у всьому об'ємі при температурі кипіння.

Температури кипіння металів дуже різні: цинк кипить при 907 °С, тобто нижче за температуру плавлення сталі; марганець — при 2060 °С; залізо — при 2860 °С. Через це при зварюванні оцинкованої сталі цинк випаровується завжди, утворюючи білий дим оксиду цинку, шкідливий для органів дихання, і залишаючи пори в шві.

Те саме явище пояснює угар легувальних елементів: марганець і кремній частково випаровуються й окиснюються, тому їх вводять у зварювальний дріт і покриття електрода з надлишком. Хімічний склад металу шва завжди відрізняється від складу дроту, і саме розрахунок на угар робить цю різницю керованою.

4. Поверхневий натяг і форма шва

Поверхневий натяг — сила, що діє вздовж поверхні рідини й прагне зменшити її площу. Він визначає форму краплі на торці електрода, момент її відриву й здатність ванни утримуватися в положенні, відмінному від нижнього.

Зварювання у стельовому положенні можливе саме тому, що поверхневий натяг утримує рідкий метал. Звідси й обмеження: чим більша ванна, тим більша її вага, і тим імовірніше, що поверхневий натяг її не втримає. Тому при зварюванні в стельовому й вертикальному положеннях знижують струм і працюють короткою дугою, зменшуючи об'єм ванни.

Змочування — інший бік того самого явища. Якщо рідкий метал добре змочує основний, він розтікається й дає плавний перехід до основного металу; якщо погано, утворюється опуклий валик із різким переходом, а це, як ми знаємо з лекції 5, концентратор напружень. Оксидна плівка, забруднення й іржа погіршують змочування, тому зачищення кромки — не формальність, а умова правильного формування шва.

Ключові формули

– Теплота плавлення: $Q = \lambda_{пл} \cdot m$, для сталі $\lambda_{пл} \approx 270$ кДж/кг

- Теплота пароутворення: $Q = r \cdot m$
- Повна теплота нагрівання й розплавлення: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T + \lambda_{пл} \cdot m$
- Сила поверхневого натягу: $F = \sigma \cdot l$
- Температура плавлення сталі: $\approx 1450\text{--}1520\text{ }^{\circ}\text{C}$; алюмінію $660\text{ }^{\circ}\text{C}$; вольфраму $3410\text{ }^{\circ}\text{C}$

Питання для самоконтролю

1. Скільки теплоти потрібно, щоб нагріти 0,5 кг сталі від $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температури плавлення $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ і повністю розплавити?
2. Чому гарячі тріщини утворюються переважно по осі шва?
3. Чому при зварюванні оцинкованої сталі виникають пори і білий дим?

ЛЕКЦІЯ 11

ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ ТІЛ. ЗВАРЮВАЛЬНІ ДЕФОРМАЦІЇ

План лекції

1. Вологість повітря. Точка роси.
2. Волога, водень і пори у шві.
3. Теплове розширення твердих тіл.
4. Природа зварювальних деформацій і способи їх зменшення.

1. Вологість повітря

Абсолютна вологість — маса водяної пари в кубометрі повітря. Відносна вологість — відношення фактичного вмісту пари до максимально можливого при даній температурі, у відсотках.

Максимально можливий вміст пари різко зростає з температурою. Тому при охолодженні повітря відносна вологість зростає, і при певній температурі пара стає насиченою — це й є точка роси. Нижче точки роси волога конденсується.

Практичний наслідок: холодний метал, занесений із вулиці в теплий цех, укривається конденсатом, бо його поверхня холодніша за точку роси цехового повітря. Зварювати такий метал одразу не можна — треба дати йому прогрітися до температури приміщення.

2. Волога, водень і пори

Волога — головне джерело водню у зварювальному виробництві. У дузі водяна пара дисоціює, атомарний водень розчиняється в рідкому металі, а при кристалізації розчинність різко падає. Водень або виділяється у вигляді бульбашок, які не встигають вийти й залишаються порами, або накопичується в мікропорожнинах, створюючи тиск, що спричиняє холодні тріщини.

Звідси всі вимоги до зберігання матеріалів. Електроди з основним покриттям гігроскопічні й потребують прожарювання при $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1–2 годин безпосередньо перед використанням із подальшим зберіганням у термопеналі. Флюс прожарюють за аналогічним режимом. Захисний газ нормують за точкою роси: для аргону вищого сорту вона має бути не вищою за мінус $55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Зачищення кромки від іржі, мастила й фарби переслідує ту саму мету: іржа — це гідроксид, тобто хімічно зв'язана вода, а мастило й фарба — джерела водню й вуглецю.

3. Теплове розширення

При нагріванні тіла розширюються. Видовження прямо пропорційне початковій довжині, зміні температури й коефіцієнту лінійного розширення.

Коефіцієнт лінійного розширення сталі становить приблизно $12 \cdot 10^{-6}$ на градус, аустенітної нержавної сталі — $17 \cdot 10^{-6}$, алюмінію — $24 \cdot 10^{-6}$, міді — $17 \cdot 10^{-6}$. Сталева балка довжиною 6 м при нагріванні на 100 градусів подовжується приблизно на 7 мм. Якщо кінці закріплені, це подовження не реалізується, і натомість виникають величезні термічні напруження.

Різниця коефіцієнтів створює окрему проблему: у різномірному з'єднанні вуглецевої сталі з аустенітною при нагріванні й охолодженні виникають напруження навіть без зовнішнього навантаження, бо метали розширюються неоднаково.

4. Зварювальні деформації

Тепер можна пояснити зварювальні деформації повністю. Дуга нагріває вузьку зону, метал у ній прагне розширитися, але холодний навколишній метал цьому перешкоджає. Нагрітий метал,

стиснутий з боків, зазнає пластичної деформації осадження — він просто стає коротшим у пластичному стані. При охолодженні цей укорочений об'єм скорочується ще більше й тягне за собою всю конструкцію.

Так виникають поздовжнє й поперечне вкорочення, кутова деформація стикового шва з розкриттям кромek, жолоблення листів, грибоподібність поясу балки і втрата стійкості тонкого листа, який після зварювання «хвилює».

Заходи боротьби впливають безпосередньо з фізики. Зменшення погонної енергії скорочує об'єм нагрітої зони. Зворотноступінчасте зварювання не дає теплоті накопичуватися на одній ділянці. Симетричне розташування швів і зварювання від середини до країв урівноважують деформації. Зворотний вигин деталі при складанні компенсує очікуване жолоблення. Жорстке закріплення у кондукторі стримує деформації, але натомість підвищує залишкові напруження — це завжди компроміс. Термічна обробка після зварювання, високий відпуск при 600–650 °С, знімає залишкові напруження, бо при цій температурі границя текучості падає і напруження релаксують.

Ключові формули

– Відносна вологість: $\varphi = (p / p_n) \cdot 100 \%$

– Лінійне розширення: $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$

– Об'ємне розширення: $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T$, $\beta \approx 3\alpha$

– Термічне напруження при повному защемленні: $\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$

– Коефіцієнти α : сталь $12 \cdot 10^{-6}$, нержавна сталь $17 \cdot 10^{-6}$, алюміній $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Питання для самоконтролю

1. Сталева труба довжиною 8 м нагрівається на 120 °С. На скільки вона подовжиться? Яке напруження виникне, якщо її кінці жорстко закріплені?
2. Чому електроди з основним покриттям потребують прожарювання, а невиконання цієї вимоги призводить до тріщин?
3. Чому холодний метал, занесений у теплий цех, не можна зварювати одразу?

ЛЕКЦІЯ 12

ГОРІННЯ ГАЗІВ. ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ЗВАРЮВАННЯ. ПОГОННА ЕНЕРГІЯ

План лекції

1. Горіння як фізико-хімічний процес. Теплота згоряння.
2. Ацетилено-кисневе полум'я: будова й температура.
3. Тепловий баланс процесу зварювання.
4. Погонна енергія й термічний цикл зварювання.

1. Горіння й теплота згоряння

Горіння — швидка екзотермічна реакція окиснення, що супроводжується виділенням теплоти й світла. Для повного згоряння потрібне цілком певне співвідношення пального й окисника.

Теплота згоряння ацетилену становить приблизно 48 МДж/м³ — найвища серед технічних горючих газів; пропану — близько 88 МДж/м³ за об'ємом, але горить він із меншою швидкістю й нижчою температурою полум'я. Саме швидкість горіння, а не лише теплота, визначає температуру полум'я: ацетилен горить у кисні настільки швидко, що теплота не встигає розсіятися.

Для згоряння одного об'єму ацетилену теоретично потрібно 2,5 об'єму кисню, з яких приблизно 1,1–1,2 подають з балона, а решта надходить із повітря.

2. Ацетилено-кисневе полум'я

Полум'я має три зони. Ядро — яскраве світне утворення, де ацетилен розкладається. Відновна зона одразу за ядром має найвищу температуру, до 3100–3150 °С; саме її і встановлюють на відстані 2–4 мм від поверхні металу, бо вона не тільки найгарячіша, а й захищає метал від окиснення. Факел — зовнішня зона з надлишком продуктів згоряння, температура нижча.

Співвідношення кисню й ацетилену визначає характер полум'я. Нормальне полум'я при співвідношенні близько 1,1–1,2 застосовують для зварювання сталі. Окиснювальне з надлишком

кисню має коротше ядро й застосовується для латуні. Науглецьовувальне з надлишком ацетилену має розмите ядро й потрібне при наплавленні твердих сплавів і зварюванні чавуну. Фізична причина відмінностей — саме температура й хімічна активність зон. Надлишок кисню вигоряє вуглець і легувальні елементи, надлишок ацетилену науглецьовує метал.

3. Тепловий баланс зварювання

Складемо баланс для дугового зварювання. Уся енергія, що виділяється в дузі, розподіляється так: частина втрачається випромінюванням і на нагрівання захисного газу, частина йде на плавлення електрода, частина — на плавлення основного металу й утворення ванни, решта відводиться теплопровідністю в деталь і зрештою розсіюється в цеху.

Корисною в цьому балансі є тільки невелика частка. Порівняння способів показує: при ручному дуговому зварюванні покритим електродом ефективний ККД 0,7–0,8, під флюсом — 0,85–0,9, в аргоні неплавким електродом — 0,5–0,6, при газовому зварюванні — лише 0,3–0,4. Останнє число пояснює, чому газове зварювання застосовують переважно для тонкого металу й ремонтних робіт, а не для серійного виробництва.

Але той самий низький ККД дає газовому полум'ю перевагу в іншому: нагрівання плавніше й ширше, тому газове полум'я добре підходить для підігріву, правки жолоблення й зварювання чавуну, де різкий нагрів неприпустимий.

4. Погонна енергія й термічний цикл

Погонна енергія — головний узагальнений параметр режиму. Вона визначає розміри ванни, ширину зони термічного впливу, швидкість охолодження і, через неї, структуру та властивості з'єднання.

Термічний цикл зварювання — це графік зміни температури в даній точці металу з часом: швидке нагрівання до максимуму, коротке перебування при високій температурі й охолодження з характерною швидкістю. Для сталей найважливішим є час охолодження в інтервалі від 800 до 500 °С, бо саме в ньому відбуваються структурні перетворення.

Збільшення погонної енергії подовжує цей час і знижує ризик загартування й холодних тріщин, але водночас розширює зону термічного впливу, укрупнює зерно й підвищує деформації. Зменшення погонної енергії дає протилежний набір наслідків. Вибір режиму — завжди пошук компромісу між двома групами дефектів, і саме тому в технологічній карті вказують не одне число, а діапазон.

Ключові формули

- Теплота згоряння газу: $Q = q \cdot V$
- Витрата кисню на згоряння ацетилену: $V_k \approx 1,1 \dots 1,2 \cdot V_a$
- Ефективна теплова потужність дуги: $q_e = \eta \cdot U_d \cdot I_{зв}$
- Погонна енергія: $q_p = q_e / v_{зв}$
- Температура відновної зони ацетилено-кисневого полум'я: до 3150 °С

Питання для самоконтролю

1. Скільки теплоти виділиться при повному згорянні 0,8 м³ ацетилену?
2. Чому для зварювання застосовують саме відновну зону полум'я, а не ядро й не факел?
3. Як зміняться ширина зони термічного впливу й швидкість охолодження шва при збільшенні погонної енергії, і які дефекти при цьому стають імовірнішими?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 1 проводиться після завершення модуля II й охоплює матеріал лекцій 1–12.

МОДУЛЬ III. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

5 лекцій, 10 годин

ЛЕКЦІЯ 13

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЗАРЯД, НАПРУЖЕНІСТЬ, ПОТЕНЦІАЛ. ЄМНІСТЬ. ПРОВІДНИКИ І ДІЕЛЕКТРИКИ

План лекції

1. Електричний заряд. Закон Кулона.

2. Електричне поле: напруженість і потенціал.
3. Провідники й діелектрики. Пробій.
4. Ємність. Конденсаторне зварювання.

1. Заряд і закон Кулона

Електричний заряд — властивість частинок брати участь в електромагнітній взаємодії. Заряд дискретний і кратний елементарному заряду електрона; у замкненій системі він зберігається.

Закон Кулона: сила взаємодії двох точкових зарядів прямо пропорційна їхньому добутку й обернено пропорційна квадрату відстані. Наявність середовища послаблює взаємодію у стільки разів, яка його діелектрична проникність.

2. Напруженість і потенціал

Електричне поле характеризують силовою величиною — напруженістю, і енергетичною — потенціалом. Напряга між двома точками дорівнює різниці потенціалів.

Для однорідного поля між двома пластинами напруженість дорівнює напрузі, поділеній на відстань. Це співвідношення пояснює запалювання дуги: доки електрод не торкнувся виробу, повітряний проміжок є ізолятором, але при малій відстані напруженість поля стає достатньою для початку іонізації.

Саме тому в установках аргонодугового зварювання застосовують осцилятор: він подає на проміжок імпульси високої напруги, до кількох тисяч вольтів, які пробивають проміжок і запалюють дугу без дотику вольфрамового електрода до виробу. Дотик тут неприпустимий, бо забруднює електрод вольфрамом і металом.

3. Провідники й діелектрики

У провідниках є вільні носії заряду, у діелектриках їх практично немає. Метали — провідники завдяки вільним електронам; гума, пластик, кераміка, суха деревина — діелектрики.

Кожен діелектрик має електричну міцність — напруженість, вище якої настає пробій. Для повітря вона становить приблизно 3 кВ/мм у сухому стані й різко знижується при підвищенні вологості або забрудненні.

Звідси вимоги до зварювального обладнання. Ізоляція електродотримача й кабелю повинна бути неушкодженою; кабель із потертою ізоляцією при напрузі холостого ходу 70–80 В і вологих руках становить реальну небезпеку. Ізоляція струмопровідних частин, діелектричні рукавиці, гумовий килимок і сухий спецодяг — це все застосування поняття електричної міцності діелектрика.

Окремо слід пам'ятати: напруга холостого ходу джерела завжди вища за робочу напругу дуги. Саме вона, а не напруга дуги, визначає небезпеку ураження до моменту запалювання.

4. Ємність і конденсаторне зварювання

Ємність — здатність провідника або системи провідників накопичувати заряд. Конденсатор накопичує енергію в електричному полі між обкладками.

На цьому побудоване конденсаторне зварювання: батарея конденсаторів заряджається порівняно повільно, а розряджається за тисячні частки секунди, віддаючи всю накопичену енергію у мікроскопічну зону контакту. Потужність у момент розряду величезна, а загальна енергія мала, тому нагрівання локалізоване й деталь практично не деформується.

Це основа приварювання шпильок, кріпильних елементів теплоізоляції, а також точкового зварювання тонких і різномірних матеріалів. Керованим параметром є накопичена енергія, яка пропорційна ємності й квадрату напруги заряджання — подвоєння напруги збільшує енергію вчетверо.

Ключові формули

- Закон Кулона: $F = k \cdot q_1 \cdot q_2 / (\epsilon \cdot r^2)$, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
- Напруженість поля: $E = F / q$
- Однорідне поле: $E = U / d$
- Ємність конденсатора: $C = q / U$
- Енергія зарядженого конденсатора: $W = C \cdot U^2 / 2$
- Електрична міцність сухого повітря: $\approx 3 \text{ кВ/мм}$

Питання для самоконтролю

1. Батарея ємністю 60 000 мкФ заряджена до 400 В. Яку енергію вона віддає при розряді?
2. Навіщо в установках аргонодугового зварювання потрібен осцилятор?
3. Чому напруга холостого ходу джерела небезпечніша за напругу дуги?

ЛЕКЦІЯ 14

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

План лекції

1. Електричний струм. Сила струму й густина струму.
2. Закон Ома. Опір провідника.
3. Закон Джоуля — Ленца.
4. Контактне зварювання й зварювальне коло.

1. Струм і густина струму

Електричний струм — упорядкований рух заряджених частинок. Сила струму дорівнює заряду, що проходить через переріз за одиницю часу.

Густина струму — сила струму, віднесена до площі перерізу. Саме вона, а не сила струму, визначає нагрівання провідника й поведінку електрода. Допустима густина струму для мідного кабелю становить приблизно 5 А/мм², для електродного стрижня — 10–20 А/мм² залежно від типу покриття.

Звідси правило вибору струму для електрода: для електрода діаметром 3 мм робочий струм становить приблизно 80–120 А, для 4 мм — 130–180 А. Перевищення густини струму призводить до перегріву стрижня, обсіпання покриття й погіршення захисту ванни.

2. Закон Ома й опір

Закон Ома для ділянки кола: сила струму прямо пропорційна напрузі й обернено пропорційна опору. Для повного кола враховують ще й внутрішній опір джерела.

Опір провідника пропорційний питомому опору й довжині та обернено пропорційний площі перерізу. Питомий опір міді становить 0,017 Ом·мм²/м, алюмінію 0,028, сталі приблизно 0,1, нержавної сталі близько 0,7.

Різниця питомих опорів має пряме технологічне значення. Нержавна сталь має в сім разів більший питомий опір, ніж вуглецева, тому електродний стрижень із неї нагрівається значно сильніше — і саме тому електроди для нержавних сталей роблять коротшими й зварюють на знижених струмах.

Опір металів зростає з температурою. Холодний електрод і розігрітий до кінця проходу — це різні опори, і цим частково пояснюється зміна поведінки дуги наприкінці електрода.

3. Закон Джоуля — Ленца

Кількість теплоти, що виділяється у провіднику, пропорційна квадрату сили струму, опору й часу. Квадратична залежність від струму — головне, що треба запам'ятати. Збільшення струму на 20 % підвищує тепловиділення на 44 %, удвічі — вчетверо. Тому перегрів кабелю або поганого контакту настає значно швидше, ніж підказує інтуїція.

Той самий закон пояснює, чому поганий контакт небезпечний. Зворотний кабель, притиснутий до іржавої поверхні, має великий перехідний опір; на ньому виділяється теплота, контакт нагрівається, опір зростає ще більше, і процес наростає лавиноподібно. Наслідок — підпалювання, пошкодження деталей й падіння напруги на дузі.

4. Контактне зварювання й зварювальне коло

Контактне зварювання є прямим технологічним застосуванням закону Джоуля — Ленца. Струм проходить через з'єднані деталі, і найбільше теплоти виділяється там, де найбільший опір, — у місці контакту деталей. Метал у цій зоні розігрівається до пластичного стану або плавлення, і зусилля електродів утворює з'єднання.

Умова якісного з'єднання така: опір у місці контакту деталей має бути істотно більшим за опір контакту деталей — електрод. Тому електроди роблять із міді з високою електропровідністю й охолоджують водою, а поверхні деталей ретельно зачищають, бо окалина й іржа змінюють опір непередбачувано.

Струми при контактному зварюванні вимірюються тисячами й десятками тисяч ампер, а час — сотими частками секунди. Енергія при цьому помірна, бо час малий, але миттєва потужність величезна.

Зварювальне коло дугового зварювання також слід розглядати цілісно: джерело — зварювальний кабель — електродотримач — електрод — дуга — виріб — зворотний кабель — джерело. Опір кожної ділянки зменшує напругу на дузі. Довгий кабель малого перерізу, розкладений бухтою, дає відчутне падіння напруги й нестабільну дугу — це щоденна практична проблема на монтажі.

Ключові формули

- Сила струму: $I = q / t$
- Густина струму: $j = I / S$
- Закон Ома для ділянки: $I = U / R$
- Опір провідника: $R = \rho \cdot l / S$
- Закон Джоуля — Ленца: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$
- Питомий опір: мідь 0,017; алюміній 0,028; сталь $\approx 0,1$ Ом·мм²/м

Питання для самоконтролю

1. Мідний зварювальний кабель перерізом 50 мм² і довжиною 30 м проводить струм 250 А. Який його опір і скільки теплоти виділиться за 10 хвилин роботи?
2. Чому поганий контакт зворотного кабелю з виробом призводить до лавиноподібного перегріву?
3. Чому при контактному зварюванні електроди виготовляють із міді й охолоджують водою?

ЛЕКЦІЯ 15

СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА. ВАХ ДУГИ. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА

План лекції

1. Струм у металах, електролітах і газах.
2. Електрична дуга: будова й умови горіння.
3. Вольт-амперна характеристика дуги й джерела.
4. Термoeлектричні явища. Термопари.

1. Струм у різних середовищах

У металах носіями заряду є вільні електрони, у рідинах — іони, у газах — і електрони, і іони. Природа носіїв визначає поведінку середовища.

Газ у звичайному стані — ізолятор, бо вільних носіїв у ньому немає. Щоб газ почав проводити струм, його треба іонізувати: вибити електрони з атомів. Іонізація можлива за рахунок високої температури, електричного поля високої напруженості або випромінювання.

Розряд буває несамостійним, якщо існує лише при дії зовнішнього іонізатора, і самостійним, коли підтримує себе сам. Зварювальна дуга — саме самостійний розряд: висока температура в проміжку забезпечує термічну іонізацію, а вона, у свою чергу, підтримує температуру.

2. Електрична дуга

Зварювальна дуга має три ділянки: катодну область, стовп дуги й анодну область. Катодна й анодна області дуже тонкі — тисячні частки міліметра, але на них припадає більша частина падіння напруги.

Розподіл теплоти між ділянками неоднаковий, і це має пряме практичне значення. При зварюванні постійним струмом на аноді виділяється більше теплоти, ніж на катоді. Тому пряма полярність, коли виріб є анодом, дає глибше проплавлення виробу; зворотна полярність, коли анодом є електрод, дає менше проплавлення й більше тепла на електроді.

Звідси конкретні технологічні правила. Зварювання тонкого металу й електродами з основним покриттям ведуть на зворотній полярності. Аргонодугове зварювання алюмінію потребує зворотної полярності або змінного струму, бо саме при роботі виробу катодом відбувається катодне руйнування оксидної плівки, яка має температуру плавлення понад 2000 °С і без руйнування унеможливорює зварювання.

Температура стовпа дуги становить 5000–7000 К, температура плазми при плазмовому різанні — до 20 000 К.

3. Вольт-амперні характеристики

Статична ВАХ дуги — залежність напруги на дузі від струму при незмінній довжині. Вона має три ділянки: спадну при малих струмах, жорстку в робочому діапазоні та зростаючу при великих струмах і в захисному газі.

Джерело живлення має власну зовнішню характеристику. Стійке горіння дуги можливе лише в точці перетину характеристик дуги й джерела, причому перетин має бути таким, щоб мале збурення не виводило систему з рівноваги.

Звідси головне правило вибору джерела. Для ручного дугового зварювання покритим електродом і для аргонодугового зварювання неплавким електродом потрібна крутоспадна характеристика: при зміні довжини дуги рукою зварника струм майже не змінюється, і режим зберігається. Для напівавтоматичного зварювання плавким електродом потрібна жорстка характеристика: при випадковому подовженні дуги струм падає, швидкість плавлення дроту зменшується, і дуга сама відновлює довжину — це і є саморегулювання дуги.

Розуміння цих двох випадків знімає більшість питань про те, чому не можна зварювати напівавтоматом від джерела для ручного зварювання і навпаки.

4. Термоелектричні явища

Якщо спаяти два різнорідні провідники й нагріти місце з'єднання, між вільними кінцями виникає термоЕРС, приблизно пропорційна різниці температур. Це явище Зеєбека.

На ньому працює термопара — основний засіб вимірювання високих температур у зварювальному виробництві. Хромель-алюмелева термопара працює до 1100 °С і використовується для контролю температури попереднього підігріву й термообробки, платиноводій-платинова — до 1600 °С.

Термопару застосовують у печах для прожарювання електродів, у печах термообробки зварних вузлів для зняття напружень, у контактних термометрах для перевірки температури підігріву перед зварюванням. Альтернативою є термокрейда, яка плавиться при заданій температурі, і безконтактний пірометр, про який ітиметься в лекції 19.

Ключові формули

- Напруга дуги: $U_d = a + b \cdot I_d$ (a — сума катодного й анодного падінь, b — градієнт у стовпі)
- Потужність дуги: $P_d = U_d \cdot I_{зв}$
- Умова стійкості: перетин ВАХ дуги та зовнішньої характеристики джерела
- ТермоЕРС: $E = \alpha \cdot (T_1 - T_2)$
- Температура стовпа дуги: 5000–7000 К; плазмового струменя — до 20 000 К

Питання для самоконтролю

1. Чому при зварюванні на прямій полярності проплавлення виробу глибше, ніж на зворотній?
2. Яку зовнішню характеристику повинно мати джерело для напівавтоматичного зварювання і чому саме таку?
3. Чому алюміній зварюють аргонодуговим способом на зворотній полярності або на змінному струмі?

ЛЕКЦІЯ 16

МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. ВИХРОВІ СТРУМИ

План лекції

1. Магнітне поле струму. Індукція магнітного поля.
2. Дія магнітного поля на провідник зі струмом. Магнітне дуття.
3. Електромагнітна індукція. Закон Фарадея.
4. Вихрові струми. Магнітопорошковий і вихрострумний контроль.

1. Магнітне поле струму

Навколо будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле. Його силовою характеристикою є магнітна індукція. Лінії магнітного поля прямого провідника — концентричні кола, напрям визначають правилом свердлика.

Магнітна проникність середовища змінює індукцію. Феромагнетики — залізо, нікель, кобальт і сталі на їхній основі — мають проникність у сотні й тисячі разів більшу за одиницю, тому вони «втягують» у себе магнітні лінії. Аустенітні нержавні сталі, алюміній і мідь практично немагнітні, і це визначає, які методи контролю до них застосовні.

При нагріванні вище точки Кюрі, для заліза це 768 °С, феромагнітні властивості зникають. Саме тому магнітні тримачі не працюють на попередньо підігрітій деталі.

2. Магнітне дуття

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера. Стовп дуги — це теж провідник зі струмом, тільки газовий і рухливий, тому зовнішнє магнітне поле відхиляє дугу вбік. Це явище називають магнітним дуттям.

Причини його появи на практиці такі: несиметричне під'єднання зворотного кабелю, близькість великої маси феромагнітного металу з одного боку від шва, залишкова намагніченість труби або деталі, зварювання на великих постійних струмах.

Наслідки — відхилення дуги, несиметричне проплавлення, подрізи з одного боку шва, розбризкування. Особливо часто з цим стикаються при зварюванні намагнічених труб на трасі, де дуга буквально не тримається в розділці.

Заходи боротьби прямо впливають із фізики: змінити точку під'єднання зворотного кабелю або підключити його з двох боків, зменшити струм, нахилити електрод у бік дуття, застосувати змінний струм, за якого дуття практично не проявляється, або розмагнітити деталь.

3. Електромагнітна індукція

При зміні магнітного потоку через контур у ньому виникає ЕРС індукції, пропорційна швидкості зміни потоку. Правило Ленца визначає її напрям: індукційний струм протидіє причині, що його викликала.

Це явище — фізична основа трансформатора, будь-якого зварювального джерела змінного струму, генератора зварювального агрегату та індукційних нагрівників.

4. Вихрові струми й методи контролю

У суцільному провіднику, вміщеному в змінне магнітне поле, виникають замкнені вихрові струми. Вони спричиняють нагрівання й самі створюють магнітне поле.

Нагрівання вихровими струмами використовують цілеспрямовано: індукційний підігрів стиків труб перед зварюванням і індукційна термообробка зварних з'єднань дають рівномірний нагрів без відкритого полум'я і з точним контролем температури.

У тому самому явищі полягає й метод контролю. Вихрострумова дефектоскопія: котушка збуджує вихрові струми в деталі, а дефект змінює їхній розподіл, що відбивається на параметрах котушки. Метод застосовний до будь-яких електропровідних матеріалів, зокрема й до немагнітних — алюмінію й аустенітної нержавної сталі.

Магнітопорошковий контроль має іншу природу, але теж магнітну. Деталь намагнічують; біля поверхневої тріщини магнітні лінії виходять назовні, утворюючи поле розсіювання, і нанесений на поверхню магнітний порошок збирається саме там, роблячи тріщину видимою. Метод дуже чутливий до поверхневих і підповерхневих тріщин, але застосовний лише до феромагнітних матеріалів. Для аустенітних нержавних сталей він не працює — і це пряме продовження того, з чого починалася ця лекція.

Ключові формули

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

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

– Закон електромагнітної індукції: $\mathcal{E} = -\Delta \Phi / \Delta t$

– ЕРС самоіндукції: $\mathcal{E}_s = -L \cdot \Delta I / \Delta t$

– Точка Кюрі для заліза: 768 °С

Питання для самоконтролю

1. Які причини викликають магнітне дуття і якими способами його усувають?
2. Чому магнітопорошковий контроль не застосовують до з'єднань з аустенітної нержавної сталі, а вихрострумівий — застосовують?
3. На якому фізичному явищі ґрунтується індукційний підігрів стику труби?

ЛЕКЦІЯ 17

ЗМІННИЙ СТРУМ. ТРАНСФОРМАТОР. ВИПРЯМЛЯЧІ ТА ІНВЕРТОРИ. ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА

План лекції

1. Змінний струм. Діюче значення. Частота.
2. Трансформатор. Зварювальний трансформатор.
3. Випрямлячі та інверторні джерела.
4. Дія струму на людину. Електробезпека зварника.

1. Змінний струм

Змінний струм періодично змінює напрям і величину. Промислова частота в Україні — 50 Гц, тобто струм змінює напрям 100 разів за секунду.

Прилади показують діюче значення, яке приблизно в 1,41 раза менше за амплітудне. Напруга мережі 380 В — це діюче значення, амплітудне становить близько 537 В.

Для дуги змінний струм має особливість: двічі за період він проходить через нуль, і дуга в ці моменти гасне й повинна повторно запалюватися. Саме тому дуга змінного струму менш стійка, і для її стабілізації в покриття електродів вводять сполуки калію, натрію й кальцію, що знижують потенціал іонізації газового проміжку.

2. Зварювальний трансформатор

Трансформатор змінює напругу змінного струму. Відношення напруг дорівнює відношенню чисел витків; потужність у первинній і вторинній обмотках майже однакова, тому в скільки разів знижується напруга, у стільки ж зростає струм.

Зварювальний трансформатор знижує 380 або 220 В до напруги холостого ходу 60–80 В, підвищуючи струм до сотень ампер. Крутоспадну характеристику отримують збільшенням індуктивного опору: рухомим магнітним шунтом, рухомими обмотками або окремим дроселем. Регулювання струму — це фактично регулювання індуктивності.

Трансформатор працює тільки на змінному струмі: на постійному потік не змінюється, ЕРС у вторинній обмотці не виникає. Це пряме продовження закону Фарадея з попередньої лекції.

3. Випрямлячі та інвертори

Випрямляч перетворює змінний струм на постійний за допомогою напівпровідникових діодів, які пропускають струм лише в одному напрямі. Зварювальний випрямляч — це трансформатор, випрямний блок і дросель для згладжування пульсацій. Постійний струм дає стійкішу дугу й можливість вибору полярності.

Інверторне джерело працює інакше. Мережна напруга спочатку випрямляється, потім за допомогою транзисторів перетворюється на змінний струм високої частоти — десятки кілогерців, — трансформується й знову випрямляється. Виграш величезний: розміри й маса магнітопроводу обернено пропорційні частоті, тому інвертор масою 6 кг замінює трансформатор масою 60 кг.

Крім маси, інвертор дає точне електронне керування характеристикою, функції гарячого старту, форсажу дуги й антиприлипання, а також вищий ККД. Зворотний бік — чутливість до перепадів напруги в мережі, до вологості й пилу, тому інвертор потребує акуратнішої експлуатації, ніж трансформатор.

4. Електробезпека

Небезпеку для людини становить сила струму, що проходить через тіло. Відчутний струм починається приблизно з 1 мА, невідпускний — з 10–15 мА, фібриляційний — з 100 мА. Струм визначається напругою та опором тіла, а опір сухої шкіри становить десятки кілоом і падає до 1 кОм при вологій шкірі й до сотень ом при пошкодженій.

Тому напруга холостого ходу 70–80 В, безпечна для сухих рук, стає смертельно небезпечною у вологому приміщенні, всередині котла або резервуара, при роботі в мокрому спецодязі. Для таких умов нормативи вимагають обмежувачів напруги холостого ходу.

Заходи захисту: захисне заземлення корпусу джерела, справна ізоляція кабелів і електродотримача, діелектричні рукавиці й взуття, гумовий килимок, сухий спецодяг, заборона працювати з відкритим корпусом, відключення джерела на час тривалих перерв.

Окремо — правило роботи в замкнених просторах: зварник усередині ємності працює під наглядом, зі страхувальним канатом, зі зниженою напругою освітлення й обов'язковою вентиляцією. Тут поєднуються дві небезпеки, розглянуті в цьому курсі: електрична й та, про яку йшлося в лекції 6, — накопичення важкого за повітря захисного газу.

Ключові формули

– Діюче значення: $I_d = I_{\max} / \sqrt{2} \approx 0,707 \cdot I_{\max}$

– Коефіцієнт трансформації: $k = U_1/U_2 = N_1/N_2 = I_2/I_1$

– Потужність: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

– Закон Ома для тіла людини: $I_l = U / R_l$

– Напруга холостого ходу зварювальних джерел: 60–80 В

Питання для самоконтролю

1. Зварювальний трансформатор має 400 витків первинної обмотки при напрузі 380 В і напругу холостого ходу 70 В. Скільки витків має вторинна обмотка?
2. Чому інверторне джерело в десять разів легше за трансформатор тієї самої потужності?
3. Чому напруга холостого ходу 70 В вважається відносно безпечною в сухому цеху і смертельно небезпечною всередині резервуара?

МОДУЛЬ IV. КОЛИВАННЯ, ХВИЛІ ТА ОПТИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 18

МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС. ХВИЛІ. ЗВУК І УЛЬТРАЗВУК

План лекції

1. Коливання: амплітуда, період, частота. Резонанс.
2. Хвилі. Довжина хвилі, відбивання, заломлення.
3. Звук і ультразвук. Шум на робочому місці.
4. Ультразвукова дефектоскопія та ультразвукове зварювання.

1. Коливання й резонанс

Коливання — рух, що повторюється в часі. Його характеризують амплітудою, періодом і частотою. Вільні коливання затухають через тертя; вимушені підтримуються зовнішньою періодичною силою.

Резонанс — різке зростання амплітуди, коли частота зовнішньої сили збігається з власною частотою системи. У техніці він буває і корисним, і руйнівним.

Руйнівна сторона добре відома в зварних конструкціях: вібрація від роботи механізмів на власній частоті звареної рами або трубопроводу призводить до втомних тріщин, які починаються, як ми знаємо з лекції 5, від концентраторів у швах. Корисна сторона — вібраційна обробка зварних конструкцій: конструкцію піддають вібрації на резонансній частоті, і залишкові напруження частково релаксують. Цей спосіб дешевший за пічний відпуск, хоч і менш ефективний.

2. Хвилі

Хвиля — поширення коливань у середовищі. Довжина хвилі дорівнює добутку швидкості на період. Поздовжні хвилі поширюються в будь-якому середовищі, поперечні — тільки у твердих тілах, і ця обставина є основою ультразвукового контролю.

Хвилі відбиваються від межі двох середовищ, заломлюються при переході й дифрагують на перешкодах, порівнянних із довжиною хвилі. Частка відбитої енергії тим більша, чим сильніше

відрізняються акустичні опори середовищ — саме тому межа «сталь — повітря» відбиває ультразвук практично повністю.

3. Звук і ультразвук

Людське вухо сприймає коливання від 16 Гц до 20 кГц. Нижче — інфразвук, вище — ультразвук. Швидкість звуку в повітрі становить 340 м/с, у сталі — близько 5900 м/с для поздовжніх хвиль. Шум на зварювальній ділянці нормують: гранично допустимий рівень на робочому місці становить 80 дБ. Плазмове різання дає 95–110 дБ, а це вже потребує обов'язкового застосування протишумових навушників або вкладишів. Шкала децибел логарифмічна, тому зростання на 10 дБ означає збільшення інтенсивності в десять разів.

4. Ультразвукові технології

Ультразвукова дефектоскопія — основний метод контролю зварних швів поряд із радіографічним. П'єзоелектричний перетворювач випромінює в метал короткий ультразвуковий імпульс частотою 2–5 МГц; імпульс відбивається від протилежної поверхні або від дефекту й повертається. За часом повернення визначають глибину залягання дефекту, за амплітудою — його умовний розмір.

Оскільки межа «метал — повітря» відбиває ультразвук майже повністю, метод чудово виявляє тріщини, непровари й несплавлення — тобто найнебезпечніші плоскі дефекти, які радіографія бачить гірше. Обов'язковою умовою є контактне середовище — шар мастила або гелю між перетворювачем і деталлю, бо навіть тонкий прошарок повітря повністю відбив би імпульс і не пропустив його в метал.

Ультразвукове зварювання — зовсім інше застосування того самого діапазону. Механічні коливання частотою 20–40 кГц, прикладені до з'єднуваних деталей із зусиллям стиснення, руйнують оксидні плівки й забезпечують з'єднання у твердій фазі, без розплавлення. Так з'єднують алюміній, мідь, різні метали й пластмаси.

Ключові формули

- Період і частота: $T = 1/\nu$
- Довжина хвилі: $\lambda = \nu \cdot T = \nu/\nu$
- Період математичного маятника: $T = 2\pi \cdot \sqrt{l/g}$
- Швидкість звуку: у повітрі 340 м/с, у сталі ≈ 5900 м/с
- Глибина залягання дефекту: $h = \nu \cdot t / 2$
- Рівень шуму: $L = 10 \cdot \lg(I/I_0)$, ГДР на робочому місці 80 дБ

Питання для самоконтролю

1. Ультразвуковий імпульс повернувся через 8 мкс. На якій глибині в сталі розташований дефект?
2. Чому ультразвуковий контроль неможливий без контактного мастила?
3. Чому вібрація трубопроводу на резонансній частоті небезпечна саме для зварних з'єднань?

ЛЕКЦІЯ 19

ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ХВИЛЬОВА ТА КВАНТОВА ОПТИКА. ЛАЗЕР

План лекції

1. Шкала електромагнітних хвиль.
2. Теплове випромінювання. Пірометрія.
3. Випромінювання зварювальної дуги й захист зору.
4. Квантова оптика. Лазерне зварювання та різання.

1. Шкала електромагнітних хвиль

Електромагнітні хвилі утворюють неперервну шкалу: радіохвилі, інфрачервоне випромінювання, видиме світло від 380 до 780 нм, ультрафіолет, рентгенівське й гамма-випромінювання. Природа у всіх одна, різниця лише в частоті, а з нею — в енергії кванта.

Зварювальна дуга випромінює одночасно в трьох діапазонах: інфрачервоному, видимому й ультрафіолетовому. Кожен діє на людину по-своєму, і саме тому захист має бути комплексним.

2. Теплове випромінювання й пірометрія

Будь-яке тіло з температурою вище абсолютного нуля випромінює. Потужність випромінювання пропорційна четвертому степеню абсолютної температури, а довжина хвилі, на яку припадає максимум, обернено пропорційна температурі — це закон зміщення Віна.

Звідси зв'язок кольору й температури, яким зварник користується щодня: темно-червоне світіння відповідає приблизно 700 °С, вишнево-червоне — 900, оранжеве — 1100, світло-жовте — 1300, біле — понад 1400 °С. Оцінка «на око» є грубою, але для контролю температури підігріву вона працює.

Точним інструментом є пірометр — прилад, що вимірює температуру за інтенсивністю теплового випромінювання, без контакту з деталлю. Його головна особливість, про яку часто забувають: показання залежать від коефіцієнта випромінювання поверхні. Блискуча полірована сталь має низький коефіцієнт, окиснена — високий, і той самий пірометр на тій самій температурі покаже різні значення. Тому перед вимірюванням коефіцієнт випромінювання задають відповідно до стану поверхні.

3. Випромінювання дуги й захист зору

Ультрафіолет становить головну небезпеку. Він викликає електроофтальмію — запалення рогівки й кон'юнктиви, що проявляється через кілька годин після опромінення відчуттям піску в очах, слезотечею і світлобоязню, а також опіки відкритої шкіри. Видиме випромінювання засліплює, інфрачервоне нагріває й при тривалій дії вражає кришталік.

Захист — світлофільтр, номер якого підбирають за силою струму: для струмів до 100 А застосовують фільтри 9–10, для 100–200 А — 11, для 200–300 А — 12, понад 300 А — 13 і вище. Занизький номер не захищає, зависокий змушує наближати обличчя до ванни й дихати зварювальним аерозолем.

Автоматично затемнювані щитки типу «хамелеон» містять рідкокристалічний фільтр, що темнішає за частки мілісекунди. Важливо розуміти: ультрафіолетовий захист у таких щитках забезпечує постійний шар і діє завжди, навіть коли фільтр не затемнений. Проте несправний щиток, що не затемнюється, все одно неприпустимий через сліпучу яскравість видимого світла. Захист потрібен не лише зварнику, а й оточенню: пересувні ширми з негорючого матеріалу захищають людей на сусідніх робочих місцях, бо для електроофтальмії достатньо випадкового погляду на чужу дугу.

4. Квантова оптика й лазер

Світло має подвійну природу: у явищах інтерференції та дифракції воно поводить як хвиля, у фотоефекті — як потік квантів. Енергія кванта пропорційна частоті.

Фотоефект — виривання електронів світлом — покладено в основу фотодатчиків і систем стеження за стиком у зварювальних автоматах.

Лазер створює вимушене випромінювання: когерентне, монохроматичне, з мінімальною розбіжністю пучка. Завдяки цьому промінь фокусується у пляму діаметром у частки міліметра, і густина потужності в ній сягає мільйонів ват на квадратний сантиметр.

Технологічні наслідки прямі. Лазерне зварювання дає вузький глибокий шов, мінімальну зону термічного впливу й мінімальні деформації, бо енергія вводиться в дуже малий об'єм. Лазерне різання забезпечує вузький різ і високу точність. Обмеження — висока вартість обладнання й вимоги до точності складання: зазор у стику практично неприпустимий, бо промінь просто проходить крізь нього.

Лазерне випромінювання становить окрему небезпеку для зору, зокрема й у невидимому інфрачервоному діапазоні, де немає захисного змикання повік. Тому для лазерних установок застосовують спеціальні окуляри, підібрані під конкретну довжину хвилі, і огороження робочої зони.

Ключові формули

– Швидкість світла: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с

– Енергія фотона: $E = h \cdot \nu$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

– Закон Стефана — Больцмана: $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$

– Закон зміщення Віна: $\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$

– Видиме світло: 380–780 нм

Питання для самоконтролю

1. Який номер світлофільтра слід обрати для зварювання на струмі 250 А і чому небезпечні як занижений, так і завищений номер?
2. Чому показання пірометра залежать від стану поверхні деталі?
3. Чому лазерне зварювання дає меншу зону термічного впливу й менші деформації, ніж дугове?

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.
3. Спектральний аналіз металу.
4. Рентгенівське випромінювання й радіографічний контроль.

1. Будова атома

Атом складається з важкого позитивно зарядженого ядра й електронної оболонки. Розміри ядра приблизно у сто тисяч разів менші за розміри атома, але в ньому зосереджена майже вся маса.

За постулатами Бора електрон може перебувати лише в певних стаціонарних станах із визначеною енергією, не випромінюючи. Випромінювання або поглинання кванта відбувається при переході між станами, і енергія кванта дорівнює різниці енергій рівнів.

Наслідок фундаментальний: кожен хімічний елемент має власний, тільки йому притаманний набір енергетичних рівнів, а отже, власний набір спектральних ліній.

2. Спектри

Розжарені тверді тіла й рідини дають суцільний спектр — саме такий випромінює розплавлений метал ванни. Розріджені гази дають лінійчатий спектр із набором окремих ліній, характерних для елемента.

Спектр поглинання утворюється, коли світло від джерела суцільного спектра проходить крізь холодний газ: газ поглинає точно ті лінії, які сам випромінює у нагрітому стані.

Плазма зварювальної дуги випромінює лінійчатий спектр, у якому присутні лінії всіх елементів, що потрапили в проміжок: заліза, марганцю, кремнію, а також аргону чи компонентів електродного покриття.

3. Спектральний аналіз

Спектральний аналіз визначає хімічний склад речовини за її спектром. Для зварювального виробництва це найважливіше практичне застосування атомної фізики.

Стилоскопування — якісний і напівкількісний аналіз безпосередньо на робочому місці: на поверхні деталі збуджують дугу й розглядають спектр через стилоскоп, порівнюючи інтенсивність характерних ліній. Метод дозволяє за хвилину відрізнити вуглецеву сталь від легованої й перевірити наявність хрому, нікелю, молібдену, титану.

Це не формальна процедура. Вхідний контроль марки основного металу, зварювального дроту й електродів обов'язковий для відповідальних конструкцій, бо помилкове застосування дроту не тієї марки виявиться лише після руйнування. Так само перевіряють метал шва в готовому з'єднанні, підтверджуючи, що зварювання виконано призначеними матеріалами.

Сучасні портативні спектрометри дають кількісний склад за секунди, але фізична основа в них та сама — набір ліній, характерний для кожного елемента.

4. Рентгенівське випромінювання

Рентгенівське випромінювання виникає при гальмуванні швидких електронів у речовині анода. У рентгенівській трубці електрони прискорюються напругою в десятки й сотні кіловольтів і б'ють по мішені.

Проникність випромінювання зростає з напругою на трубці, а поглинання в матеріалі — з його густиною й товщиною. Інтенсивність за шаром речовини спадає експоненційно.

Радіографічний контроль зварних швів побудований саме на цьому. Джерело з одного боку шва, плівка або цифровий детектор — з іншого. Там, де в шві є пора, шлакове включення або непровар, тобто менш густа ділянка, випромінювання поглинається слабше, і на знімку з'являється темніша пляма.

Метод відмінно виявляє об'ємні дефекти — пори, шлакові включення — і дає документальне зображення, яке зберігається. Обмеження в тому, що плоскі дефекти, розташовані впоперек променя, тріщина або несплавлення по кромці, можуть бути невидимі: промінь проходить крізь тріщину майже без додаткового ослаблення. Тому радіографію й ультразвуковий контроль застосовують як взаємодоповнювальні, а не взаємозамінні методи.

Чутливість контролю оцінюють за еталоном чутливості — набором дротиків або канавок відомого розміру, які вкладають на шов і які мають бути видимими на знімку.

Ключові формули

- Енергія кванта при переході: $h\nu = E_2 - E_1$
- Енергія фотона: $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$
- Ослаблення випромінювання: $I = I_0 \cdot e^{(-\mu d)}$
- Енергія, набута електроном у трубці: $E = e \cdot U$
- Зв'язок одиниць: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Питання для самоконтролю

1. Чому за спектром можна однозначно визначити хімічний елемент?
2. Чому радіографічний контроль добре виявляє пори, але може не виявити тріщину?
3. Для чого на шов укладають етalon чутливості перед просвічуванням?

ЛЕКЦІЯ 21

БУДОВА ЯДРА. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ГАММА-ДЕФЕКТоскопія. ДОЗИ ТА РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ

План лекції

1. Будова ядра. Енергія зв'язку.
2. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.
3. Гамма-дефектоскопія зварних швів.
4. Дози опромінення й захист персоналу.

1. Будова ядра

Ядро складається з протонів і нейтронів, які утримуються ядерними силами — найпотужнішими з відомих, але короткодійними.

Енергія зв'язку — енергія, потрібна для повного розщеплення ядра на нуклони. Маса ядра менша за суму мас вільних нуклонів на величину дефекту маси, пов'язану з енергією зв'язку співвідношенням Ейнштейна.

Питома енергія зв'язку максимальна для елементів середини таблиці, поблизу заліза. Саме тому енергія вивільняється і при поділі важких ядер, і при синтезі легких.

2. Радіоактивність

Радіоактивність — самочинне перетворення нестійких ядер із випромінюванням частинок. Альфа-випромінювання — ядра гелію, має малу проникність і затримується аркушем паперу. Бета-випромінювання — електрони, затримується алюмінієвою пластиною в кілька міліметрів. Гамма-випромінювання — електромагнітні хвилі найвищої енергії, для його ослаблення потрібні свинець або бетон.

Закон радіоактивного розпаду: кількість ядер спадає вдвічі за кожен період напіврозпаду. Період напіврозпаду — незмінна характеристика ізотопу, на яку не впливають ні температура, ні тиск, ні хімічний стан.

Активність джерела вимірюється в бекерелях, на практиці — у гігабекерелях і кюрі.

3. Гамма-дефектоскопія

Гамма-дефектоскопія — той самий за суттю метод, що й радіографія, але джерелом слугує не трубка, а радіоактивний ізотоп.

Найпоширеніші джерела: іридій-192 із періодом напіврозпаду 74 доби, придатний для просвічування сталі товщиною приблизно 10–100 мм; селен-75 із періодом 120 діб для малих товщин 5–30 мм із кращою якістю зображення; кобальт-60 із періодом 5,3 року для великих товщин 40–200 мм.

Перевага перед рентгенівською трубкою — незалежність від електромережі, компактність і можливість панорамного просвічування кільцевих швів трубопроводу зсередини за одну експозицію. Саме тому на трасах магістральних трубопроводів застосовують переважно гамма-дефектоскопію.

Недоліки прямо впливають із фізики. Джерело не можна вимкнути: воно випромінює завжди, і безпека забезпечується лише захисним контейнером. Активність із часом падає, тому час експозиції доводиться постійно перераховувати — через 74 доби іридієве джерело потребує вдвічі довшої експозиції, ніж на початку. Приблизно через рік роботи джерело підлягає заміні.

4. Дози й захист

Поглинена доза вимірюється в греях, еквівалентна — у зівертах, із урахуванням коефіцієнта якості випромінювання. Природний фон дає людині приблизно 2–3 мЗв на рік. Гранично допустима доза для персоналу категорії А становить 20 мЗв на рік у середньому за п'ять років.

Захист будується на трьох принципах, кожен із яких є прямим наслідком фізики випромінювання. Захист часом: доза пропорційна часу перебування, тому всі операції з джерелом відпрацьовують заздалегідь на макеті. Захист відстанню: інтенсивність спадає обернено пропорційно квадрату відстані, тому подвоєння відстані зменшує дозу вчетверо, і саме тому джерело переносять штангою, а не руками. Захист екраном: свинцевий контейнер, бетонна стінка, спеціальний бокс. Організаційно це означає огороження зони контролю, знаки радіаційної небезпеки, роботу в неробочий час або на ізольованому майданчику, обов'язковий індивідуальний дозиметр у кожного дефектоскопіста й радіометричний контроль після кожного повернення джерела в контейнер.

Для зварника головне правило просте: у зоні, огороженій знаком радіаційної небезпеки під час просвічування, перебувати не можна незалежно від виробничої необхідності.

Ключові формули

– Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{-(t/T)}$

– Активність: $A = \lambda \cdot N$, одиниця — бекерель

– Дефект маси: $\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\alpha}$

– Енергія зв'язку: $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot c^2$

– Захист відстанню: $I \sim 1/r^2$

– Періоди напіврозпаду: Ir-192 — 74 доби; Se-75 — 120 діб; Co-60 — 5,3 року

Питання для самоконтролю

1. Джерело на основі іридію-192 має активність 100 ГБк. Якою вона стане через 222 доби?
2. Чому гамма-дефектоскопію застосовують на трасі трубопроводу, а рентгенівську трубку — переважно в цеху?
3. У скільки разів зменшиться доза опромінення, якщо збільшити відстань до джерела з 2 до 8 метрів?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 2 проводиться після завершення модуля V і охоплює матеріал лекцій 13–21.