

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ЗПО «ДІТК»

Олександр СТРИЛЕЦЬ

31.08.2025 р.

ПОГОДЖЕНО

Заступник директора з навчально-методичної роботи ЗПО «ДІТК»

Сергій ГОРДІЄНКО

31.08.2025 р.

РОЗГОРНУТИЙ ОПОРНИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ ОК 23 «КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ»

Рівень освіти: Фахова передвища освіта (ОПС «Фаховий молодший бакалавр»).

Спеціальність: 131 Прикладна механіка.

Освітньо-професійна програма: «Зварювальне виробництво».

Загальний обсяг лекційного курсу: 26 годин (13 лекцій).

УВАГА: ВАЖЛИВА ІНФОРМАЦІЯ ЩОДО АВТОРСЬКИХ ПРАВ ТА ДОСТУПУ

Цей документ є розширеним академічним конспектом лекційного матеріалу, адаптованим для самостійного опрацювання. Повна мультимедійна версія лекційного курсу, яка включає інтерактивні анімації поширення ультразвукових хвиль, автентичні відеодемонстрації проведення капілярного та магнітопорошкового контролю, базу оцифрованих радіограм (рентгенівських знімків) високої роздільної здатності та мануали до цифрових дефектоскопів, є інтелектуальною власністю та авторською розробкою викладацького складу.

Повна лекція доступна виключно для зареєстрованих здобувачів освіти ЗПО «Дніпровський професійний технологічний коледж», які мають авторизований корпоративний доступ на спеціалізованому хмарному сховищі закладу. Будь-яке публічне поширення, копіювання, цитування без дозволу або передача повних матеріалів третім особам суворо заборонені.

МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ ДЕФЕКТОЛОГІЇ ТА ВІЗУАЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ (VT)

Лекція 1. Вступ. Еволюція систем якості у зварювальному виробництві.

Сучасне машинобудівне виробництво спирається на парадигму, згідно з якою якість неможливо створити на етапі фінальної перевірки виробу відділом технічного контролю (ВТК). Якість має бути інтегрована в продукт на кожному етапі його життєвого циклу. Фундаментом управління є стандарти серії **ISO 9001**, які регламентують систему менеджменту якості (QMS) на підприємстві.

Зварювання належить до категорії так званих "спеціальних процесів" (Special processes). Це означає, що якість зварного з'єднання неможливо повністю підтвердити без руйнування самого виробу. Саме тому для зварювального виробництва розроблено специфічний галузевий стандарт **ISO 3834** («Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів»). Він гарантує, що якщо підприємство має кваліфікований персонал, перевірене обладнання та атестовані технології, то зварений шов а priori матиме високу якість. Стандарт ISO 3834 визначає відповідальність координатора зварювальних робіт (Welding Coordinator), який несе персональну відповідальність за вибір зварювальних матеріалів, технологій та обсягів неруйнівного контролю (NDT - Non-Destructive Testing).

Лекція 2. Міжнародна класифікація дефектів зварних з'єднань (ISO 6520).

В інженерній практиці чітко розмежовують два поняття: "недосконалість" (imperfection) — будь-яке відхилення від ідеальної геометрії шва, та "дефект" (defect) — недосконалість, розміри якої перевищують допустимі норми, що призводить до бракування деталі.

Міжнародний стандарт **ISO 6520-1** уніфікує комунікацію дефектоскопістів у всьому світі, поділяючи всі недосконалості на 6 магістральних груп з присвоєнням їм унікальних цифрових кодів:

1. **Тріщини (Код 100):** Найнебезпечніші дефекти. Діють як надгострі концентратори напружень. Поділяються на поздовжні (101), поперечні (102), кратерні (104). Фізико-металургійні причини: гарячі тріщини виникають у процесі кристалізації через наявність легкоплавких евтектик (сірки і фосфору) в умовах розтягувальних напружень. Холодні тріщини виникають у високоміцних сталях після охолодження (нижче 200°C) через дифузію атомарного водню та утворення крихких мартенситних структур.
2. **Порожнини (Код 200):** Газові пори (2011), рівномірно розподілена пористість (2012), свищі (2016), усадкові раковини (202). Причина: гази (водень, азот, оксид вуглецю), що виділяються з розплаву, не встигають покинути зварну ванну через її швидке твердіння (наприклад, вологі електроди, наявність іржі або протяг, що здуває захисний газ).
3. **Тверді включення (Код 300):** Шлакові включення (301), флюсові (302), оксидні плівки (303), вольфрамові включення (304 — характерні для TIG зварювання при торканні електродом ванни). Знижують робочий переріз шва.
4. **Непровари та відсутність сплавлення (Код 400):** Відсутність сплавлення між валиками (401), непровар кореня шва (402). Причини: занижена сила струму, завищена швидкість зварювання, малий кут розчину кромок або зміщення дуги магнітним дуттям. Дефект критичний при динамічних навантаженнях.
5. **Відхилення форми та розмірів (Код 500):** Підрізи (501) — канавки в основному металі вздовж краю шва; надмірне підсилення (502); напливи (506); провисання кореня (504); кутове зміщення кромок (507).
6. **Інші недосконалості (Код 600):** Випадкове запалювання дуги (601), бризки металу (602).

Лекція 3. Рівні якості зварних з'єднань (ISO 5817) та Візуальний контроль (VT).

Наявність недосконалості не завжди означає брак виробу. Допустимість дефекту визначається його розмірами, типом та відповідальністю самої конструкції. Європейський стандарт **ISO 5817** встановлює три рівні якості:

- **Рівень В (Stringent — Жорсткий):** Для конструкцій високої відповідальності (посудини під тиском, авіація, мости), що працюють при високих динамічних або втомних навантаженнях.
- **Рівень С (Intermediate — Середній):** Для конструкцій загального машинобудування зі статичними навантаженнями.
- **Рівень D (Moderate — Помірний):** Для невідповідальних конструкцій, де вимоги до міцності мінімальні (огорожі, допоміжні опори).

Залежно від рівня якості та товщини основного металу t , стандарт наводить табличні допуски. Наприклад, підріз (501) для рівня В має бути не глибшим за 0.5 мм, тоді як для рівня D допускається глибина до 1 мм. Тріщини і непровари є неприпустимими для всіх рівнів (крім мікроскопічних винятків для рівня D).

Візуально-вимірювальний контроль (VT - Visual Testing) є базовим, обов'язковим першим етапом неруйнівного контролю. Він проводиться до, під час і після зварювання. Жоден інший метод NDT (УЗД, радіографія) не застосовується, доки шов не пройде VT. На етапі VT інспектор перевіряє геометрію шва, катети, наявність зовнішніх тріщин та підрізів.

Лекція 4. Ергономіка контролю: вимоги до освітлення та оптичні прилади.

Око інспектора є головним "приладом" під час VT, тому його фізіологія жорстко регламентується стандартами. Мінімальна освітленість поверхні, що контролюється, повинна становити **не менше 350 люкс**, а для відповідального детального контролю — понад 500 люкс. Використовуються спрямовані джерела світла. Огляд має проводитися так, щоб око

знаходилося на відстані не більше 600 мм від об'єкта, а кут зору до поверхні становив не менше 30 градусів (для уникнення сильних спотворень).

Оптичні прилади для VT розширюють можливості ока:

- **Вимірювальні лупи** (зі збільшенням від 2х до 10х) з вбудованими мікрометричними шкалами для точного вимірювання ширини розкриття мікротріщин.
- **Ендоскопи (жорсткі борескопи)** — оптичні прилади з лінзовими системами для заглядання у труби малого діаметра (від 4 мм).
- **Відеоендоскопи (гнучкі)** — використовують CCD або CMOS матриці на кінці гнучкого зонда і передають цифрове зображення на монітор. Ідеальні для контролю кореня шва магістральних трубопроводів або складних збірних колекторів зсередини.

Вимірювання катетів, опуклостей та зміщення кромки виконують Універсальними шаблонами зварювальника (УШС-3, УШС-4) або міжнародними шаблонами типу Bridge Cam Gauge (WG).

МОДУЛЬ 2. ПОВЕРХНЕВА ТА УЛЬТРАЗВУКОВА ДЕФЕКТОСКОПІЯ (РТ, МТ, УТ)

Лекція 5. Капілярний контроль (РТ - Penetrant Testing).

Метод застосовується для виявлення вкрай тонких поверхневих тріщин, пор і непроварів (з розкриттям від 1 мікрона), які неможливо помітити під час VT. Він універсальний: працює на чорних сталях, алюмінії, міді, титані, склі та кераміці.

Фізична основа: Базується на явищах капілярності та змочування. Коли рідина (пенетрант) з низьким поверхневим натягом і дуже малим крайовим кутом змочування наноситься на поверхню, вона миттєво втягується навіть у мікроскопічні щілини під дією капілярного тиску (описується рівнянням Лапласа: $P = 2\sigma \cdot \cos(\theta) / r$).

Технологія РТ-контролю:

1. Попереднє очищення (Cleaner): знежирення поверхні летючими розчинниками.
2. Нанесення пенетранту: рідина (зазвичай червона) наноситься на шов розпиленням або пензлем. Час проникнення становить 10-30 хвилин.
3. Проміжне очищення: надлишок пенетранту змивається з поверхні водою або розчинником. Ключова майстерність — не вимити пенетрант із самої тріщини.
4. Нанесення проявника (Developer): наноситься тонкий шар сорбенту (білої крейдяної суспензії). Проявник працює як губка, витягуючи залишки червоного пенетранту з тріщини на білий фон (явище зворотної дифузії).
5. Інспекція: утворюється яскравий контрастний індикаторний слід. Його ширина в десятки разів більша за реальне розкриття тріщини, що робить її добре видимою. Існують флуоресцентні пенетранти, які оглядаються під УФ-лампю в темній кімнаті — вони забезпечують найвищий, 4-й клас чутливості (для аерокосмічних деталей).

Лекція 6. Магнітопорошковий контроль (МТ - Magnetic Testing).

Застосовується для пошуку поверхневих та підповерхневих (на глибині до 2-3 мм) дефектів виключно у **феромагнітних матеріалах** (вуглецевих та низьколегованих сталях). Метод абсолютно неефективний для алюмінію та аустенітних (нержавіючих) сталей.

Фізика методу: Досліджувана деталь намагнічується. Якщо метал однорідний, магнітні силові лінії проходять усередині металу. Якщо на їхньому шляху трапляється дефект (тріщина), що має низьку магнітну проникність (магнітний опір повітря у тріщині в тисячі разів вищий за опір сталі), магнітні силові лінії згинаються і виходять на поверхню деталі. Утворюється локальне **поле магнітного розсіяння** з власними північним і південним полюсами на краях тріщини. Якщо на таку поверхню нанести феромагнітний порошок (сухий або у вигляді рідинної суспензії), його частинки притягуються до поля розсіяння, утворюючи чорний магнітний валик над тріщиною.

Обов'язкова умова: дефект має бути орієнтований під кутом $45^\circ - 90^\circ$ до магнітних силових ліній. Тому для повноцінного контролю деталей необхідно намагнічувати у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Використовують полюсне намагнічування (ручними електромагнітними ярмами) та циркулярне намагнічування (пропусканням струму через деталь).

Лекція 7. Ультразвуковий контроль (УТ). Фізика поширення УЗ-хвиль.

Ультразвук (УЗ) — це пружні механічні коливання середовища з частотою понад 20 кГц (вище порогу чутності людини). У дефектоскопії металів використовують діапазон частот від 1 до 10 МГц. Чим вища частота, тим менша довжина хвилі ($\lambda = c / f$), і тим дрібніші дефекти можна виявити (закон: мінімальний виявлений дефект $\approx \lambda / 2$).

П'єзоелектричний ефект: основа УЗД. Кристали кварцу, титанату барію або п'єзокераміки (ЦТС) під дією прикладеної змінної електричної напруги починають механічно деформуватися (стискатися і розширюватися), випромінюючи в метал акустичну хвилю (зворотний п'єзоэффект). І навпаки: механічна УЗ-хвиля, відбившись від дефекту і вдаривши по кристалу, викликає на його гранях електричний імпульс (прямий п'єзоэффект), який фіксується дефектоскопом.

Типи хвиль: У твердих тілах існують поздовжні хвилі (хвилі стиску-розтягу, вектор коливання частинок збігається з напрямком поширення, швидкість у сталі $c_l \approx 5900$ м/с) та поперечні (зсувні хвилі, частинки коливаються перпендикулярно до напрямку поширення, швидкість $c_t \approx 3230$ м/с). Для контролю зварних швів використовують переважно поперечні хвилі, які вводяться в метал під кутом.

Відбиття хвиль підпорядковується оптичним законам (закон Снелліуса): кут падіння дорівнює куту відбиття. На межі металу і повітря (дефект або донна поверхня) УЗ-хвиля відбивається на 99.9%, оскільки акустичні опори цих середовищ відрізняються в тисячі разів.

Лекція 8. Обладнання для УЗД: дефектоскопи, ПЕП, калібрування.

Основним інструментом є цифровий ультразвуковий дефектоскоп. Він складається з генератора потужних коротких електричних імпульсів, приймального підсилювача, мікропроцесора та дисплея (осцилографа), на якому відображається **А-скан** (вісь X — час або глибина, вісь Y — амплітуда луна-сигналу).

П'єзоелектричні перетворювачі (ПЕП) бувають прямі (вводять хвилю перпендикулярно) та похилі. Похилий ПЕП має призму з плексигласу (органічного скла), кут нахилу якої підбирається так, щоб за рахунок заломлення на межі "плексиглас-сталь" у деталі генерувалася лише поперечна хвиля під потрібним кутом (зазвичай 45° , 60° або 70°).

Мертва зона — ділянка під поверхнею ПЕП, де контроль неможливий через накладання потужного випромінюваного імпульсу на слабкий приймальний. Близня зона (зона Френеля) — ділянка, де хвилі інтерферують і амплітуда нестабільна.

УЗ-хвилі не проходять через повітря, тому між ПЕП та металом обов'язково наноситься **контактна рідина** (гліцерин, гель, масло).

Калібрування — обов'язкова процедура перед кожним контролем. Використовують еталонні блоки V1 (K1) та V2 (K2). На них налаштовують швидкість розгортки, визначають точку виходу променя з ПЕП, перевіряють фактичний кут вводу та встановлюють нуль глибиноміра (компенсують час проходження імпульсу всередині призми ПЕП).

Лекція 9. Методики УЗД. Оцінка розмірів дефекту.

Найпоширеніший метод — **луна-імпульсний (ехо-імпульсний)**. ПЕП генерує короткий імпульс (декілька мікросекунд) і "слухає" луну. Якщо у металі є пора чи непровар, частина ультразвуку відбивається від неї і повертається. На екрані з'являється пік. Знаючи швидкість звуку c та вимірявши час затримки t , мікропроцесор автоматично вираховує відстань по променю $S = c \cdot t / 2$, а через тригонометричні функції ($\sin$, $\cos$ кута вводу) видає точну глибину дефекту Y та відстань по поверхні X .

Оцінка розмірів дефекту є проблемою, адже амплітуда сигналу залежить не лише від розміру, а й від форми та орієнтації тріщини. Тому використовують концепцію **еквівалентної площі**. Дефект порівнюють з ідеальним плоским дисковим відбивачем (свердлінням) на такій самій глибині. Для автоматизації цього процесу застосовують **АРД-діаграми** (Амплітуда-Відстань-Діаметр) або побудову кривих **DAC (Distance Amplitude Correction)**. Крива DAC будується по еталонних отворах на різних глибинах і дозволяє компенсувати згасання ультразвуку: всі дефекти однакової еквівалентної площі на різних глибинах будуть досягати цієї кривої на екрані.

МОДУЛЬ 3. РАДІОГРАФІЧНИЙ КОНТРОЛЬ, МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ (RT, DT, QMS)

Лекція 10. Радіографічний контроль (RT). Джерела випромінювання.

Радіографічний контроль дозволяє отримати реальне, задокументоване зображення внутрішньої структури металу на плівці. Базується на використанні іонізуючого електромагнітного випромінювання (X-Ray та Gamma-Ray). Довжина цих хвиль надзвичайно мала (менша за міжатомну відстань у металі), що дозволяє їм проникати крізь тверді тіла.

Джерела рентгенівського випромінювання (X-Ray): Рентгенівські трубки. Електрони, випромінені нагрітим катодом, розганяються високою напругою (від 100 до 400 кВ) і вдаряються об вольфрамову мішень анода. 99% їхньої кінетичної енергії перетворюється на тепло, і лише 1% — на "гальмівне" рентгенівське випромінювання. Перевага: випромінювання можна вимкнути, а його жорсткість (проникаючу здатність) легко регулювати зміною напруги.

Джерела гамма-випромінювання (Gamma-Ray): Штучні радіоактивні ізотопи, отримані в ядерних реакторах (Іридій-192, Кобальт-60, Селен-75). Вони постійно випромінюють гамма-кванти під час альфа- та бета-розпаду ядра. Перевага: автономність (не потрібне джерело струму), малі габарити (зручно для труб). Недолік: випромінювання неможливо вимкнути, потрібні важкі свинцеві контейнери-коліматори, інтенсивність падає з часом (період напіврозпаду).

Фізика методу: Випромінювання поглинається металом (закон експоненціального послаблення Бугера-Ламберта: $I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$, де μ — лінійний коефіцієнт послаблення, d — товщина металу). Якщо всередині шва є пора або шлак (густина яких менша за сталь), то в цій зоні поглинання буде меншим, і на рентгенівську плівку, що знаходиться за деталлю, впаде більше фотонів. На проявленій негативній плівці дефект виглядатиме як **темна пляма**.

Лекція 11. Радіографічні плівки, цифрова радіографія. Еталони чутливості (IQI).

Радіографічна плівка покрита емульсією з броміду срібла, який реагує на іонізуюче випромінювання. Для прискорення процесу (зменшення часу експозиції) використовують підсилюючі екрани — металеві свинцеві фольги (генерують вторинні електрони) або флуоресцентні екрани (світяться під дією рентгену). Ключовим параметром плівки є оптична щільність почорніння (вимірюється денситометром, норма 1.5 - 3.0 D).

Тенденція 2025 року — перехід до **цифрової радіографії (CR - Computed Radiography)** з використанням багаторазових гнучких фосфорних пластин, зображення з яких зчитується лазерним сканером, та **прямої цифрової радіографії (DR)** з плоскопанельними детекторами, що дають зображення на монітор миттєво.

Для юридичної валідації кожного знімка застосовують **Еталони чутливості (IQI - Image Quality Indicators)**. За європейськими нормами (EN ISO 19232) використовують дротяні еталони: пластиковий чохол із 7-ма впаяними дротинками різного діаметра, що виготовлені з того ж металу, що й деталь. Еталон кладуть поперек шва з боку джерела випромінювання. Чутливість контролю оцінюється за найтоншою дротинкою, яку візуально чітко видно на плівці на негатоскопі.

Лекція 12. Руйнівний контроль (DT). Механічні випробування.

Неруйнівні методи знаходять дефекти, але не можуть кількісно визначити міцність металу. Тому під час атестації технологій застосовують руйнівний контроль (Destructive Testing) тестових (контрольних) зразків.

- **Випробування на статичний розтяг** (розривні машини): Визначає межу текучості σ_T (напруження, при якому починається пластична деформація), тимчасовий опір розриву σ_B (максимальне напруження) та відносне подовження δ . Обов'язково фіксується місце розриву: якщо зразок рветься по основному металу — міцність шва достатня; якщо по зварному шву — технологія бракується.
- **Випробування на статичний згин**: Плоский зразок зі швом посередині згинається навколо оправки заданого радіуса. Кут згину до появи першої тріщини характеризує пластичність з'єднання (особливо критично для загартовуваних сталей).
- **Випробування на ударний згин (Метод Шарпі)**: Зразок з V-подібним надрізом руйнується важким маятниковим копром. Оцінюється робота руйнування та ударна в'язкість (KCU , KCV). Випробування часто проводять при низьких температурах (до -60°C) для визначення порогу холодноламкості — температури, при якій в'язке (пластичне) руйнування переходить у катастрофічне крихке.
- **Вимірювання твердості**: Механізовані твердоміри (метод Віккерса з алмазною пірамідкою, макро- і мікротвердість). Виконується побудова графіка розподілу твердості по перерізу: від металу шва, через ЗТВ до основного металу. Різкі стрибки твердості в ЗТВ свідчать про утворення мартенситу і високий ризик холодних тріщин.

Лекція 13. Металографічний аналіз та міжнародна сертифікація.

Металографія — вивчення внутрішньої будови металу. Макроструктурний аналіз (неозброєним оком або лупою $\times 50$ на протравленому кислотою зрізі) дозволяє оцінити форму провару, кількість проходів, глибину проплавлення кореня, виявити макротріщини і шлаки. Мікроструктурний аналіз (під оптичним або електронним мікроскопом) вивчає розмір зерен металу шва та зони термічного впливу, фазовий склад (ферит, перліт, бейніт, мартенсит) і природу мікродефектів.

Система гарантії якості: Європейський підхід до якості не допускає до зварювання відповідальних конструкцій неперевічених робітників. Усі зварювальники повинні пройти практичні іспити та отримати сертифікат згідно з **ISO 9606** (Кваліфікаційні випробування зварювальників), який діє з обмеженнями за типом металу, просторовим положенням та товщиною. Сама технологія також має бути атестована згідно з процедурою **WPQR** (Welding Procedure Qualification Record). На заводі зварюють пробний зразок, який проходить повний спектр NDT і DT. Якщо всі тести успішні, розробляється **WPS** (Welding Procedure Specification — Специфікація процедури зварювання) — документ-паспорт, у якому жорстко прописані всі режими і матеріали, яких зварювальник зобов'язаний дотримуватися на робочому місці.