

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 «ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ» Рівень освіти: Фахова передвища освіта (ОПС «Фаховий молодший бакалавр»). **Спеціальність:** 131 Прикладна механіка. **Освітньо-професійна програма:** «Зварювальне виробництво».

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 3D-моделі вузлів (CAD modeling), автентичні відеоінструкції з машинобудівних підприємств, розширені машинобудівні та будівельні креслення (у високій роздільній здатності), технологічні карти та симуляції термодеоформаційних циклів, 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. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Лекція 1. Вступ. Класифікація зварних конструкцій та видів з'єднань. Зварна конструкція — це металева система, складена з окремих деталей, міцно та нероз'ємно з'єднаних між собою за допомогою зварювання. Сучасна прикладна механіка розглядає зварну конструкцію не як набір елементів, а як єдину синергетичну систему, що здатна сприймати та передавати навантаження. Класифікація зварних конструкцій базується на їхньому призначенні та характері роботи:

1. Будівельні конструкції: мости, естакади, каркаси промислових будівель. Вони зазнають переважно статичних навантажень та впливу кліматичних факторів.
 2. Машинобудівні конструкції: станини верстатів, корпуси редукторів, рами автомобілів. Відрізняються високою точністю виготовлення та жорсткістю.
 3. Листові конструкції (оболонкові): резервуари, газгольдери, трубопроводи. Головна вимога — абсолютна герметичність та міцність під дією внутрішнього тиску.
- За типом перерізу конструкції поділяються на суцільностінні (балки), ґратчасті (ферми, щогли) та оболонкові.

Основою будь-якої конструкції є зварне з'єднання — ділянка, де деталі з'єднані зварним швом. Існує чотири базові типи з'єднань:

- **Стикове (Butt joint):** деталі розташовані в одній площині і зварюються торцями. Це найнадійніший тип з'єднання, що забезпечує рівномірний розподіл напружень і найвищу міцність при статичних та динамічних навантаженнях.
- **Напусткове (Lap joint):** поверхні деталей частково перекривають одна одну. З'єднання виконується кутовими швами. Воно є технологічним (не вимагає точного підганяння кромek), але створює значну концентрацію напружень через злам осі передачі зусиль.

- Таврове (T-joint): торець однієї деталі примикає під кутом (зазвичай 90 градусів) до поверхні іншої. Характерно для виготовлення балок.
- Кутове (Corner joint): деталі з'єднуються краями під кутом, утворюючи просторовий кут (наприклад, при зварюванні коробів).

Зварні шви класифікуються за положенням у просторі (нижнє, вертикальне, горизонтальне, стельове), за протяжністю (суцільні, переривчасті ланцюгові та шахові) та за зовнішньою формою (опуклі, плоскі, увігнуті).

Лекція 2. Основи розрахунку з'єднань при статичних навантаженнях. Проектування конструкцій неможливе без здійснення розрахунків на міцність і жорсткість. Шви поділяються на робочі (передають зусилля від однієї деталі до іншої) та шви зв'язку (лише фіксують деталі, зусилля через них не проходять). Розрахунку підлягають виключно робочі шви. Розрахунок стикових з'єднань на розтяг та стиск базується на припущенні, що напруження по перерізу шва розподіляються рівномірно. Умова міцності: робоче напруження не повинно перевищувати допустимого. При розтязі розрахункова формула має вигляд: $\sigma = N / (S \cdot L) \leq [\sigma]_p$, де N — розтягувальне зусилля, S — розрахункова товщина металу (товщина тоншої деталі), L — розрахункова довжина шва, $[\sigma]_p$ — допустиме напруження для зварного шва при розтязі. Для підвищення міцності стикових швів часто застосовують виведення початку і кінця шва на вивідні планки, щоб уникнути впливу кратерів та несправ на початку шва. Кутові шви (флангові та лобові), якими виконують напусткові та таврові з'єднання, працюють у складних умовах. Вони руйнуються переважно від зрізу (зсуву) по бісектрисі небезпечного перерізу. Розрахункова товщина кутового шва приймається рівною $0.7 \cdot K$, де K — катет шва. Розрахунок лобових швів на зріз виконується за формулою: $\tau = N / (0.7 \cdot K \cdot L) \leq [\tau]$. Допустимі напруження для зварних швів обираються з нормативної документації (ДБН, СНіП) і залежать від межі текучості основного металу, способу зварювання (ручне, автоматичне), типу електродів та методів контролю якості.

Лекція 3. Розрахунок з'єднань при дії згину, кручення та складних навантажень. У реальних конструкціях елементи часто працюють на згин (балки) або кручення (вали). При розрахунку стикового з'єднання на згин перевіряються максимальні нормальні напруження у крайніх волокнах перерізу за формулою: $\sigma = M / W \leq [\sigma]_z$, де M — згинальний момент, W — момент опору перерізу зварного шва. Складніше розраховувати напусткові з'єднання з комбінованими швами (коли косинка приварена до стіни лобовим і двома фланговими швами), які зазнають дії моменту. У таких випадках припускають, що зварний вузол обертається навколо свого центру ваги. Визначають полярний момент інерції перерізу швів. Напруження у найбільш віддаленій точці шва розкладають на вертикальну та горизонтальну складові. При дії складного просторового навантаження (одночасна дія згинального моменту, поперечної та поздовжньої сили) застосовують енергетичну теорію міцності. Розраховують нормальні (σ) та дотичні (τ) напруження окремо, а потім знаходять еквівалентне напруження: $\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma]$. Цей алгоритм є основою роботи модулів інженерного аналізу (CAE) у сучасних CAD-системах.

Лекція 4. Динамічні та вібраційні навантаження. Втома металу.

У машинобудуванні більшість конструкцій (ротори, вали, рами автомобілів, мостові крани) працюють в умовах змінних (циклічних) та вібраційних навантажень. Багаторазове повторення навантаження призводить до явища "втоми металу" — руйнування при напруженнях, значно менших за межу текучості. Межа витривалості — це максимальне напруження, яке матеріал може витримати при базовому числі циклів (зазвичай $2 \cdot 10^6$ циклів) без руйнування. Найголовнішим ворогом зварної конструкції при динамічних навантаженнях є концентрація напружень. Вона виникає у місцях різкої зміни геометрії перерізу. Зварний шов сам по собі є концентратором через перехід від опуклості шва до основного металу. Дефекти (непровари, підрізи, скупчення пор) збільшують коефіцієнт концентрації напружень у кілька разів.

Для підвищення витривалості застосовують конструктивні та технологічні заходи:

- Використання стикових з'єднань замість напусткових (для забезпечення плавного передавання зусиль).
- Механічна обробка (шліфування) поверхні шва врівень з основним металом для усунення переходу.
- Аргонодугове оплавлення межі сплавлення (плавний перехід без підрізів).
- Застосування увігнутих кутових швів замість опуклих.

Розрахунок на втому полягає у визначенні коефіцієнта запасу міцності за амплітудою напружень та порівнянні його з допустимим (зазвичай від 1.5 до 2.5).

МОДУЛЬ 2. ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ЗВАРЮВАЛЬНІ НАПРУЖЕННЯ І ДЕФОРМАЦІЇ

Лекція 5. Технологічність конструкцій. Зварюваність сталей. Технологічність зварної конструкції — це сукупність властивостей, які визначають пристосованість конструкції до досягнення оптимальних витрат при її виготовленні, монтажі та експлуатації для заданих показників якості. Конструкція є технологічною, якщо вона потребує мінімуму металу, мінімуму витрат праці на збирання та зварювання, і дозволяє максимально застосувати автоматизовані процеси. Критерії технологічності: вільний доступ до всіх швів для автоматичного зварювального трактора або робототехнічного комплексу; використання стандартних профілів прокату; мінімізація довжини зварних швів; уникнення перетину швів в одному вузлі (що викликає дво- або тривісне напруження і ризик крихкого руйнування). Зварюваність — це властивість металу утворювати нероз'ємне з'єднання, що відповідає вимогам, зумовленим конструкцією та умовами експлуатації. Фізична зварюваність означає можливість утворення міжатомних зв'язків. Технологічна зварюваність — це реакція металу на термічний вплив зварювання. Головна проблема зварюваності вуглецевих і легированих сталей — утворення гарячих (кристалізаційних) та холодних (водневих) тріщин. Оцінка зварюваності сталей здійснюється за формулою еквівалента вуглецю (SC_{eq}). Якщо $SC_{eq} < 0.4\%$, сталь зварюється добре (без підігріву). Якщо $SC_{eq} > 0.45\%$, необхідний попередній підігрів до $150-300^\circ\text{C}$ та використання електродів з основним покриттям (низьководневих).

Лекція 6. Зварювальні деформації та напруження.

Зварювання — це процес локального високотемпературного нагрівання. Нерівномірне температурне поле викликає теплове розширення металу в зоні зварювання. Оскільки навколишній холодний метал перешкоджає вільному розширенню, нагрітий метал зазнає пластичного стиску. При подальшому охолодженні відбувається усадка (shrinkage). Оскільки метал шва не може вільно скоротитися через зв'язок з холодними ділянками, у шві виникають залишкові напруження розтягу (які можуть досягати межі текучості), а в основному металі — напруження стиску. Це призводить до зміни форми та розмірів виробу — зварювальних деформацій.

Класифікація деформацій:

- Поздовжня усадка (вкорочення деталі вздовж осі шва).
- Поперечна усадка (вкорочення перпендикулярно до осі шва).
- Кутова деформація (грибоподібність — вигинання полиць таврового з'єднання).
- Вигин конструкції (шаблеподібність балок).
- Втрата стійкості тонколистових конструкцій (хлопуни на обшивці).

Залишкові напруження небезпечні тим, що, сумуючись із робочими навантаженнями, вони можуть викликати раптове крихке руйнування (особливо при низьких температурах), а також значно знижують втому міцність і стійкість до корозійного розтріскування.

Лекція 7. Конструктивні та технологічні методи запобігання деформаціям.

Боротьба з деформаціями починається в конструкторському бюро.

Конструктивні методи:

- Зменшення кількості і перерізу зварних швів (відмова від суцільних швів на користь переривчастих, якщо це дозволяє міцність).
- Симетричне розташування швів відносно нейтральної осі перерізу (наприклад, у двотавровій балці). Деформація від одного шва компенсується деформацією від симетричного йому.

Технологічні методи (застосовуються в цеху):

- Метод попереднього зворотного вигину. Деталь перед зварюванням вигинають у бік, протилежний очікуваній деформації. Після зварювання та охолодження деталь стає рівною.
- Жорстке закріплення деталей у масивних складально-зварювальних кондукторах.
- Раціональний порядок накладання швів: метод "від середини до країв", зворотно-ступінчастий метод (шов вариться короткими ділянками у напрямку, протилежному загальному напрямку зварювання). Це забезпечує більш рівномірний розподіл тепла.

Лекція 8. Методи зняття залишкових зварювальних напружень.

Якщо запобігти напруженням не вдалося, їх необхідно усунути після зварювання.

Термічна обробка — найефективніший метод. Застосовується загальний високий відпуск. Конструкцію завантажують у піч, нагрівають до $600-650^{\circ}\text{C}$ (для вуглецевих сталей), витримують певний час (залежно від товщини стінки, приблизно 1 год на 25 мм) і повільно охолоджують разом з піччю. При цій температурі межа текучості сталі різко падає, і залишкові напруження викликають пластичну мікродеформацію, яка їх знімає (релаксація).

Механічні методи:

- Проковування (reening) шва пневматичним молотком у гарячому або холодному стані. Метал шва пластично розтягується, знімаючи напруження.
- Вібраційна обробка (Vibratory Stress Relief - VSR). Конструкцію піддають дії механічних вібрацій на резонансній частоті за допомогою дисбалансного вібратора. Це екологічна та енергоощадна альтернатива термічній обробці для великогабаритних станин машин, яка не потребує величезних печей і витрат газу/електроенергії.

МОДУЛЬ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТИПОВИХ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Лекція 9. Технологія виготовлення балкових конструкцій.

Балки (двотаврові, коробчасті) — основні елементи мостів, кранів, каркасів будівель. Оскільки прокатні профілі мають обмежену номенклатуру, великі балки виготовляють зварними з листового металу.

Технологічний процес виготовлення суцільностінної двотаврової балки:

1. Заготівельні операції: розкрій поясів і стінки на порталних машинах плазмового або термічного різання з ЧПК. Фрезерування кромek (для забезпечення рівного стикування). Якщо довжина балки перевищує довжину листа, листи спочатку зварюють у карти.
2. Складання: балку збирають на спеціальних стелажах за допомогою Г-подібних струбцин, або у високопродуктивних спеціалізованих стендах. Спочатку стінку притискають до нижнього пояса і ставлять прихватки, потім встановлюють верхній пояс.
3. Зварювання поясних швів: виконується автоматичним дуговим зварюванням під шаром флюсу за допомогою зварювального трактора. Балку встановлюють у позицію "в човник" (під кутом 45°) для отримання симетричного і глибокого провару, або зварюють "в кут" похилим електродом. Для запобігання шаблеподібності шви варять симетрично.
4. Виправлення: після зварювання полки балки деформуються (грибоподібність). Для її усунення балку пропускають через спеціальні правильні вальці, які пластично вигинають

полиці у зворотний бік. Останній етап — приварювання опорних ребер жорсткості напівавтоматом.

Лекція 10. Технологія виготовлення гратчастих конструкцій (ферм).

Ферми (кроквяні, мостові) складаються з верхнього і нижнього поясів, з'єднаних розкосами і стійками. Найчастіше їх виготовляють із парних куточків, труб або гнутих профілів. Елементи з'єднуються у вузлах за допомогою фасонки (косинки) або безпосереднім примиканням (трубчасті ферми).

Технологія складання відіграє критичну роль. В умовах одиничного виробництва ферму збирають на плазі (металевій підлозі, де розкреслена схема ферми в натуральну величину). У серійному виробництві використовують просторові кондуктори — жорсткі рами з фіксаторами, куди деталі вкладаються і закріплюються пневмопритисками.

Особливість зварювання ферм — сильна усадка. Для компенсації усадки ферму збирають із заданим будівельним підйомом (вигинають догори). Послідовність зварювання: спочатку зварюють стикові шви елементів, потім приварюють розкоси до фасонки. Шви слід накладати від середини ферми до опорних вузлів. При зварюванні куточків з фасонкою шви накладають спочатку по обушку, а потім по перу куточка, оскільки їх довжина різна (центр ваги куточка зміщений).

Лекція 11. Технологія виготовлення посудин, що працюють під тиском.

Посудини (резервуари, котли, цистерни, газгольдери) підлягають суворому нагляду (Держгірпромнагляд), оскільки їх руйнування призводить до техногенних катастроф. Головна вимога — міцність і герметичність (відсутність наскрізних дефектів).

Метод полістового складання застосовується для резервуарів з товстої сталі. Листи вальцюють (згинають у циліндр) на листозгинальних вальцях. Отримані обичайки зварюють поздовжнім швом на консольному стенді. Потім обичайки стикують між собою і зварюють кільцевими швами на роликових стендах (стенд обертає посудину, а зварювальний автомат стоїть нерухомо). Днища (сферичні, еліптичні) виготовляють штампуванням і приварюють до корпусу.

Рулонний метод (винахід Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона) зробив революцію в будівництві вертикальних резервуарів. Листи стінки та днища зварюють в єдине величезне полотнище (товщиною до 16-18 мм) на заводі за допомогою двоярусних станів автоматичним зварюванням під флюсом. 100% швів перевіряють УЗД та рентгеном. Далі полотнище намотують на спеціальний барабан (рулон), вантажать на залізничну платформу і везуть на будмайданчик. На місці рулон встановлюють вертикально і розгортають тракторами. Залишається зварити лише один вертикальний замикаючий шов. Цей метод переносить 90% зварювальних робіт із важких польових умов у контрольовані заводські.

Лекція 12. Виготовлення магістральних трубопроводів та корпусних конструкцій.

Зварювання трубопроводів (газо-, нафтопроводів) виконується в польових умовах. Труби виготовляють на металургійних заводах (прямошовні або спіральшовні). На трасі застосовують метод нарощування нитки. Головна проблема — зварювання неповоротних стиків (трубу не можна обертати). Для забезпечення співвісності та рівномірного зазору застосовують внутрішні гідравлічні центратори, які розпирають труби зсередини. Зварювання кореневого шва є критичним (неприпустимий непровар або провисання). Застосовують автоматичне орбітальне зварювання в захисних газах (зварювальна головка рухається по спеціальному бандажу навколо труби).

Корпусні конструкції (станини верстатів, корпуси редукторів) раніше виготовляли литтям із чавуну. Зварні станини з товстолистової сталі є набагато легшими, потребують менше часу на підготовку (не потрібні дорогі ливарні моделі) і дозволяють швидко вносити зміни в конструкцію. Їх зварюють напівавтоматичним або електрошлаковим зварюванням. Основна проблема — забезпечення жорсткості та відсутності деформацій під час механічної обробки

(фрезерування направляючих), тому вони обов'язково проходять високий відпуск для зняття напружень перед відправкою у механічний цех.

МОДУЛЬ 4. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ

Лекція 13. Проєктування технологічних процесів та системи САМ/САЕ. Технологічний процес (ТП) — це частина виробничого процесу, що містить цілеспрямовані дії щодо зміни стану предмета праці. ТП поділяється на технологічні операції (виконуються на одному робочому місці). Операція складається з установів, позицій та робочих ходів. Документація буває маршрутною (короткий перелік операцій і цехів) та операційною (детальний опис кожного кроку зварювальника: "Очистити кромки", "Встановити деталь у кондуктор", "Зварити шов №1, струм 250А, дріт 1.2 мм"). У 2025 році підготовка виробництва повністю спирається на комп'ютеризовані системи. САМ (Computer-Aided Manufacturing) системи отримують 3D-модель з САД-програми. Для заготівельної дільниці САМ-система виконує "Nesting" — автоматичну розкладку деталей на листі металу для мінімізації відходів і генерує G-код для верстата плазмового різання. САЕ (Computer-Aided Engineering) системи дозволяють методом скінченних елементів (МСЕ) симулювати процес зварювання на комп'ютері до початку реального виробництва: інженер бачить, куди поведе конструкцію від нагрівання, і заздалегідь коригує порядок швів.

Лекція 14. Комплексна механізація та автоматизація. Складально-зварювальне оснащення.

Час горіння дуги (основний час) становить лише 20-30% від загального часу роботи зварювальника. Решта 70-80% — це допоміжні операції: піднесення деталей, закріплення, перевертання. Комплексна механізація спрямована на скорочення допоміжного часу.

Складально-зварювальне оснащення поділяється на універсальне і спеціальне. Елементи оснащення: установлювальні (призми, кутники — задають базу), затискні (пневмоциліндри, гідрострубцини, магніти — фіксують деталь), стягувальні та розпірні (для підгонки зазорів).

Машини для позиціонування:

- Кантувачі — обертають деталь навколо горизонтальної осі (ланцюгові, двостійкові).
- Маніпулятори та позиціонери — обертають та нахиляють виріб у просторі, дозволяючи зварювальнику завжди варити в зручному нижньому положенні ("у човник").
- Роликові стенди — для обертання циліндричних посудин та труб. Вищим рівнем є Робототехнічні комплекси (РТК). Промисловий робот (зазвичай 6-осьовий антропоморфний) тримає зварювальний пальник. Робот інтегрується з позиціонером (який обертає деталь синхронно з рухом робота). Програмування РТК здійснюється як методом навчання (оператор проводить робота по точках), так і в Offline режимі безпосередньо з САД-моделі.

Лекція 15. Основи контролю якості зварних конструкцій.

Забезпечення надійності вимагає багаторівневого контролю. Він поділяється на вхідний (перевірка сертифікатів на метал і електроди), поопераційний (перевірка правильності складання та зазорів) і контроль готової продукції.

Дефекти зварних з'єднань:

- Тріщини (гарячі і холодні) — найнебезпечніший дефект. Діють як гострі концентратори напружень. Конструкція бракується і підлягає ремонту.
- Пори (газові бульбашки, що не встигли вийти). Знижують робочий переріз шва.
- Шлакові та вольфрамові вclusions.
- Непровар — відсутність сплавлення між основним металом і швом, часто виникає в корені шва через недостатній струм або малий кут розчину кромок.
- Підріз — заглиблення в основному металі по краях шва. Створює різкий концентратор.

Методи неруйнівного контролю (NDT - Non-Destructive Testing):

1. Візуально-вимірний (ВВК): огляд за допомогою лупи та універсального шаблону зварювальника (УШС). Виявляє зовнішні дефекти та перевіряє катети швів.
2. Капілярний метод (кольорова дефектоскопія): поверхню покривають пенетрантом (червоною фарбою), витирають, наносять проявник. Фарба витягується з мікротріщин, забарвлюючи білий проявник. Тільки для поверхневих дефектів.
3. Ультразвукова дефектоскопія (УЗД): п'єзоелектричний шукач посилає ультразвукову хвилю в метал. Відбиваючись від дефекту (непровару, пори), хвиля повертається і фіксується на екрані дефектоскопа. Метод швидкий, дешевий, але вимагає високої кваліфікації оператора.
4. Радіаційний контроль (рентгено- або гамма-дефектоскопія): просвічування шва рентгенівським випромінюванням з фіксацією на плівку або цифрову матрицю. Найбільш достовірний метод для виявлення внутрішніх об'ємних дефектів. Вимагає суворих заходів радіаційної безпеки.

Випробування на герметичність: гідравлічні (водою під тиском 1.25-1.5 від робочого) та пневматичні (стисненим повітрям з обмилуванням швів) випробування застосовуються для резервуарів та трубопроводів.

Лекція 17. Технологія збирання та зварювання гратчастих конструкцій (ферм).

Гратчасті конструкції (кроквяні ферми, мостові прогони, щогли, стріли кранів) є геометрично незмінними системами, що складаються зі стрижнів (поясів, стійок, розкосів). Завдяки шарнірному (теоретично) з'єднанню у вузлах, елементи ферми працюють переважно на центральний розтяг або стиск, що дозволяє максимально ефективно використовувати переріз металу порівняно з балками. Ферми виготовляють із парних куточків, швелерів, круглих або профільних труб. Збирання гратчастих конструкцій вимагає високої точності для забезпечення проектного будівельного підйому (попереднього вигину ферми вгору, який компенсує прогин під робочим навантаженням). В умовах одиничного виробництва збирання виконують на плазмі (металевій підлозі з розміткою), у серійному — у просторових жорстких кондукторах із пневматичними притисками, що фіксують геометрію вузлів.

Лекція 18. Розрахунок вузлів ферм та оптимізація послідовності зварювання.

У вузлах кроквяних ферм стрижні з'єднуються між собою безпосередньо (трубчасті ферми) або за допомогою фасонки (косинки). Товщина фасонки розраховується залежно від максимального зусилля в розкосах і зазвичай становить від 8 до 20 мм. Розрахунок кутових швів, якими розкоси з куточків приварюються до фасонки, має специфіку: оскільки центр ваги куточка не збігається з віссю симетрії полиці, зусилля розподіляється нерівномірно. Тому довжина шва по обушку куточка (\$l_1\$) завжди більша за довжину шва по перу (\$l_2\$). Зварювання ферми супроводжується значною поздовжньою усадкою. Щоб уникнути загального викривлення, розробляють сувору послідовність: спочатку зварюють стикові шви (якщо пояси складені), потім приварюють стійки і розкоси до фасонки, рухаючись від середини ферми до її опорних вузлів.

Лекція 19. Виготовлення посудин, що працюють під тиском: вимоги та норми. Посудини під тиском (газгольдері, резервуари, котли, ресивери) належать до конструкцій підвищеної небезпеки. Їх проектування та виготовлення суворо регламентується державними та міжнародними стандартами (Держгіпротомнагляд, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, ISO). Головна вимога — забезпечення абсолютної міцності та герметичності при циклічних навантаженнях і змінах температур. Оболонки циліндричних посудин (обичайки) виготовляють вальцюванням листового металу на три- або чотиривалкових згинальних машинах. Розрахунок товщини стінки циліндра виконується за котельною формулою:
$$S = (P \cdot D) / (2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi)$$
, де P — внутрішній тиск, D — діаметр, $[\sigma]$ — допустиме напруження, φ — коефіцієнт міцності зварного шва. Днища для таких посудин виготовляють сферичними або еліптичними методом гарячого штампування.

Лекція 20. Полістове та рулонне складання великогабаритних резервуарів (РВС).

Резервуари вертикальні сталеві (PBC) об'ємом від \$1000\$ до \$100000\$ \$m^3\$ виготовляють двома основними методами. Метод полістового складання передбачає зварювання кожного окремого листа безпосередньо на будівельному майданчику за допомогою спеціальних автоматів, що рухаються по верхній кромці листа (для горизонтальних швів) та тракторів (для вертикальних).

Рулонний метод, розроблений Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, є унікальною високоефективною технологією. На заводі на двоярусному стані з окремих листів автоматичним зварюванням під флюсом збирають цілі полотнища (стілки та днища). Після 100% ультразвукового або рентгенівського контролю полотнище намотують на металеву котушку (каркас), транспортують на об'єкт і розгортають за допомогою тракторів. Це дозволяє перенести 90% обсягу зварювальних робіт у контрольовані заводські умови, різко підвищуючи якість та швидкість монтажу.

Лекція 21. Технологія виготовлення металевих труб.

Сучасне трубопровідне виробництво забезпечує створення прямошовних та спіральшовних труб. Прямошовні труби (діаметром до 1420 мм) виготовляють із товстого листа (штрипса) методом покрокового формування на пресах (U-O-E процес: формування у вигляді букви U, потім O, і експандування — калібрування з розтягом). Зварювання виконується двома дугами під флюсом: спочатку внутрішній шов, потім зовнішній. Спіральшовні труби формують із рулонної сталі, згортаючи стрічку по спіралі. Перевага цього методу — з однієї ширини стрічки можна виготовляти труби різних діаметрів, змінюючи лише кут формування. Крім того, спіральний шов зупиняє магістральну тріщину у разі розриву труби.

Лекція 22. Зварювання магістральних трубопроводів. Орбітальне зварювання.

Монтаж магістральних нафто- і газопроводів відбувається в складних польових умовах. Для забезпечення співвісності та рівномірного зазору між трубами застосовують внутрішні гідравлічні або пневматичні центратори, які розпирають труби зсередини, вирівнюючи кромки. Зварювання труб виконується без їх обертання (зварювання неповоротних стиків). Найвідповідальнішим є кореневий шов, який має бути виконаний з повним проваром і без провисання всередину труби. Для автоматизації процесу використовують орбітальні зварювальні комплекси: напрямний бандаж кріпиться на трубу, і по ньому автоматично рухається зварювальна головка (TIG або MAG зварювання), змінюючи режими (струм, швидкість) залежно від просторового положення (нижнє, вертикальне на підйом, стельове).

Лекція 23. Виготовлення важких рамних та корпусних конструкцій.

До корпусних конструкцій належать станини металорізальних верстатів, пресів, корпуси важких судових редукторів та турбін. Раніше такі деталі виготовляли переважно литтям із сірого чавуну. Сучасна тенденція — заміна лиття на зварно-литі, зварно-ковані або суцільнозварні конструкції з товстолистого металу (до 100-200 мм). Зварні станини є на 30-40% легшими за чавунні при тій самій жорсткості. Для зварювання металу великої товщини за один прохід застосовують електрошлакове зварювання (ЕШЗ). Оскільки після зварювання корпусні деталі проходять точну механічну обробку (фрезерування направляючих, розточування посадкових місць під підшипники), вони обов'язково проходять термічну обробку (високий відпуск при $600-650^{\circ}\text{C}$) для повного зняття залишкових напружень. Якщо цього не зробити, деталь деформується просто під час зняття стружки на верстаті.

Лекція 24. Структура технологічного процесу: маршрутні та операційні карти.

Технологічний процес (ТП) виготовлення зварної конструкції — це детально задокументований алгоритм перетворення сировини на готовий виріб. Він складається з технологічних операцій (заготівельна, складальна, зварювальна, контрольна, термічна). Операція, у свою чергу, поділяється на установи, позиції та робочі ходи. Маршрутна карта (МК) містить лише загальний перелік цехів та операцій, через які проходить деталь.

Операційна карта (ОК) деталізує кожен крок: вказує режими зварювання ($I_{\text{зв}}$, $U_{\text{д}}$, $V_{\text{зв}}$), марки зварювальних матеріалів, типи інструментів та витрати часу на перехід. Удосконалення ТП полягає у мінімізації міжопераційних переміщень та паралельному виконанні робіт.

Лекція 25. Використання систем САМ та САЕ у зварювальному виробництві. Сучасна підготовка виробництва є повністю комп'ютеризованою. САМ-системи (Computer-Aided Manufacturing) відповідають за генерацію керуючих програм для обладнання з ЧПК. На заготівельній стадії алгоритми "Нестингу" (Nesting) автоматично розкладають контури деталей на аркуші металу для портальних машин плазмового чи лазерного різання, забезпечуючи коефіцієнт використання матеріалу (КВМ) понад 85%. САЕ-системи (Computer-Aided Engineering), такі як Sysweld або ANSYS, використовують метод скінченних елементів (МСЕ) для віртуальної симуляції процесу зварювання. Інженер на екрані бачить температурне поле від рухомої дуги, фазові перетворення в металі та прогнозоване жолоблення конструкції ще до початку її реального виготовлення. Це дозволяє оптимізувати режими та послідовність швів без витрат металу на натурні експерименти.

Лекція 26. Складально-зварювальне оснащення: кондуктори, кантувачі, маніпулятори.

Для переходу від одиничного до серійного виробництва застосовують спеціальне оснащення, що забезпечує точне базування деталей та скорочує допоміжний час на вивіряння розмірів.

- **Кондуктори:** жорсткі рами з базовими поверхнями, упорами та швидкодіючими пневматичними або гідравлічними затискачами. Деталі вкладаються в кондуктор і миттєво фіксуються в проєктному положенні.
- **Кантувачі:** пристрої для обертання довгомірних важких деталей (балок, рам) навколо горизонтальної осі (центрові, двостійкові, ланцюгові кантувачі). Дозволяють зварювальнику перевести шов у зручне положення ("у човник").
- **Позиціонери та маніпулятори:** мають обертову планшайбу, яка здатна як обертатися, так і змінювати кут нахилу, забезпечуючи оптимальну швидкість зварювання кільцевих швів.

Лекція 27. Комплексна автоматизація та робототехнічні комплекси (РТК). Еволюція зварювального виробництва веде до впровадження робототехнічних комплексів (РТК). РТК складається з промислового антропоморфного робота (найчастіше 6-осьового), зварювального джерела живлення, блоку охолодження, пристрою очищення пальника та керованого позиціонера, на якому закріплена деталь. Робот і позиціонер працюють як єдина кінематична система, керована одним контролером (синергетичне управління). Програмування роботів здійснюється як у режимі Online (навчання за допомогою пульта Teach Pendant, коли оператор проводить пальник по точках траєкторії), так і в режимі Offline (програмування в 3D-середовищі на комп'ютері без зупинки реального обладнання, що значно скорочує час простою).

Лекція 28. Основи контролю якості. Дефекти зварних з'єднань.

Якість зварної конструкції закладається на всіх етапах. Дефекти класифікують на зовнішні та внутрішні.

- **Тріщини (гарячі і холодні):** найбільш критичні дефекти. Гарячі тріщини виникають у процесі кристалізації через наявність домішок сірки і фосфору. Холодні тріщини утворюються у високоміцних сталях після охолодження через вплив дифузійного водню та мартенситних перетворень. Шви з тріщинами бракуються і підлягають вирізанню.
- **Пори:** газові порожнини, утворені киснем, азотом або воднем, що не встигли виділитися з розплаву через іржу на кромках або вологу у флюсі.
- **Непровар:** відсутність сплавлення між основним і наплавленим металом у корені шва. Виникає через малий зазор, низький струм або велику швидкість зварювання. Діє як різкий концентратор напружень.

- **Підріз:** локальне заглиблення (канавка) в основному металі вздовж межі зварного шва. Значно знижує витривалість при динамічних навантаженнях.

Лекція 29. Неруйнівні методи контролю (NDT): УЗД, радіографія, капілярний контроль. Для виявлення дефектів без пошкодження виробу застосовують неруйнівний контроль (Non-Destructive Testing).

1. **Візуально-вимірний контроль (ВВК):** обов'язковий перший етап. Виконується візуально за допомогою лупи та Універсального шаблону зварювальника (УШС) для перевірки катетів, висоти підсилення та виявлення поверхневих пор і підрізів.
2. **Капілярна дефектоскопія:** для пошуку мікротріщин, невидимих оку. На очищену поверхню наносять яскравий рідкий пенетрант, який проникає в порожнини. Після видалення залишків наносять білий проявник — пенетрант витягується з тріщин, утворюючи яскравий індикаторний слід.
3. **Ультразвукова дефектоскопія (УЗД):** п'єзоперетворювач випромінює УЗ-хвилі вглиб металу. Відбиваючись від несправу або пори, хвиля повертається на приймач і формує пік (луна-сигнал) на екрані дефектоскопа. Метод високоефективний і безпечний для персоналу.
4. **Радіаційний контроль:** просвічування шва рентгенівським або гамма-випромінюванням. Випромінювання проходить крізь метал і фіксується на плівці. У місцях пор і несправ метал тонший, тому на плівці утворюються темні плями. Це найнадійніший метод, але він вимагає свинцевого захисту та евакуації персоналу.

Лекція 30. Техніко-економічні показники виробництва зварних конструкцій. Завершальним етапом інженерної підготовки виробництва є економічне обґрунтування технологічного процесу. Ефективність процесу оцінюється за кількома критеріями:

- **Матеріаломісткість:** нормування витрат металу (з урахуванням відходів на припуски та обрізь) та зварювальних матеріалів. Витрати електродів розраховуються за формулою: $G_{\text{ел}} = G_{\text{н}} / (1 - K_{\text{в}})$, де $G_{\text{н}}$ — маса наплавленого металу (визначається за площею перерізу шва, його довжиною та густиною металу), а $K_{\text{в}}$ — коефіцієнт втрат на чад, розбризкування та недогарки.
- **Трудомісткість:** нормування часу. Технічна норма часу на операцію $T_{\text{н}}$ складається з основного (технологічного) часу $T_{\text{о}}$ (безпосередньо час горіння дуги), допоміжного часу $T_{\text{д}}$ (встановлення деталі, зачищення шлаку, зміна електрода), часу на обслуговування робочого місця та часу на перерви.
- **Енергоємність:** розрахунок витрат електроенергії на роботу зварювальних трансформаторів/інверторів та допоміжного устаткування. Впровадження автоматизації (наприклад, зварювання під флюсом замість ручного дугового) дозволяє різко зменшити машинний час $T_{\text{о}}$, підвищити продуктивність праці та знизити собівартість готової зварної конструкції, що є кінцевою метою інженера-технолога.