

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.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТА «ТЕХНОЛОГІЧНЕ УСТАТКУВАННЯ»

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

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма: «Зварювальне виробництво»

ЛЕКЦІЯ 1. ВСТУП. КЛАСИФІКАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ТА ЗОВНІШНІ ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ (2 години)

1.1. Роль технологічного устаткування у зварювальному виробництві

Сучасне зварювальне виробництво є високотехнологічною галуззю машинобудування, що немислима без застосування складного комплексу електротехнічного, механічного та електронного обладнання. Технологічне устаткування зварювального цеху умовно класифікують на три базові групи:

1. **Джерела живлення зварювальної дуги:** апарати, що перетворюють електричну енергію промислової мережі (змінний струм високої напруги) в енергію, придатну для стабільного горіння дуги (струм високої сили та низької напруги).
2. **Механічне та складальне обладнання:** кондуктори, кантувачі, маніпулятори, позиціонери, роликові стенди. Їхня головна функція — жорстка фіксація деталей та зміна їх просторового положення для виконання зварювання в оптимальному (найчастіше нижньому) положенні.
3. **Допоміжне та автоматизоване обладнання:** системи подачі захисних газів і флюсів, системи охолодження, зварювальні каретки, роботи-маніпулятори та системи стеження за стиком (Seam Tracking).

1.2. Електричні параметри зварювальної дуги та ЗВАХ

Зварювальна дуга є потужним електричним розрядом у газовому середовищі. Її поведінка описується **статичною вольт-амперною характеристикою дуги (СВАХ)** — залежністю напруги на дузі U_d від сили зварювального струму $I_{\text{зв}}$ при сталій довжині дуги L_d . СВАХ дуги має нелінійний характер і складається з трьох ділянок: падаючої (при малих струмах), жорсткої (при середніх струмах) та зростаючої (при великих струмах, характерних для зварювання під флюсом).

Для забезпечення стабільного горіння дуги електричні параметри джерела живлення повинні відповідати параметрам дуги. Ця відповідність визначається **зовнішньою вольт-амперною характеристикою (ЗВАХ) джерела живлення** — залежністю напруги на вихідних клеммах апарата від сили струму в зварювальному колі.

Класифікація ЗВАХ:

- **Стрімкопадаюча (Constant Current - CC):** Напруга різко падає при збільшенні струму. Застосовується для ручного дугового зварювання покритими електродами (MMA) та аргонодугового зварювання неплавким електродом (TIG). Головна перевага: при зміні довжини дуги (наприклад, через тремтіння руки зварювальника) сила струму змінюється незначно. Це забезпечує сталість теплової потужності дуги та стабільність проплавлення

металу. Струм короткого замикання $I_{\text{кз}}$ лише на 20-30% перевищує робочий струм, що запобігає перегріву джерела живлення при прилипанні електрода.

- **Жорстка або пологопадаюча (Constant Voltage - CV):** Напруга залишається майже незмінною при значних змінах сили струму. Використовується для механізованого зварювання плавким електродом у захисних газах (MIG/MAG). Така характеристика забезпечує ефект **саморегулювання довжини дуги**: якщо дуга випадково скорочується, сила струму миттєво і різко зростає (оскільки характеристика горизонтальна), швидкість плавлення дроту збільшується, і дуга миттєво подовжується до початкового значення без втручання механізмів.
- **Зростаюча:** Напруга зростає зі збільшенням струму. Використовується для автоматичного зварювання під флюсом (SAW) на високих густинах струму.

1.3. Режими роботи устаткування: ТВ та ТН

Будь-яке джерело живлення нагрівається під час проходження електричного струму (закон Джоуля-Ленца). Щоб уникнути перегріву та пробою ізоляції, робота устаткування строго регламентується паспортом. За європейським стандартом EN 60974-1 цикл роботи зварювального апарата приймається рівним 10 хвилинам.

- **Тривалість включення (ТВ) або Duty Cycle (DC):** Відношення часу роботи апарата під навантаженням (горіння дуги) t_p до загального часу робочого циклу $t_{\text{ц}}$:

$$TB = \frac{t_p}{t_p + t_x} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\%$$

де t_x — час роботи на холостому ходу (пауза).

Якщо в паспорті інвертора вказано $I_{\text{ном}} = 300 \text{ A}$ при $TB = 60\%$, це означає, що при струмі 300 А апарат може безперервно працювати 6 хвилин, після чого 4 хвилини він повинен охолоджуватися.

Для перерахунку зварювального струму при зміні тривалості роботи використовують формулу теплового еквівалента. Якщо необхідно зварювати автоматичним швом без зупинок ($TB_x = 100\%$), максимально допустимий струм I_x розраховується як:

$$I_x = I_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{TB_{\text{ном}}}{TB_x}}$$

1.4. Зварювальні трансформатори

Зварювальний трансформатор — це статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення змінного струму промислової мережі (напругою 220 В або 380 В) на змінний струм тієї ж частоти (50 Гц), але меншої напруги (60-80 В холостого ходу), необхідної для безпечного підпалу та стабільного горіння дуги.

Для створення крутопадаючої ЗВАХ у трансформаторах застосовують штучне збільшення індуктивного опору (магнітного розсіяння). Це досягається конструктивними методами:

- **Трансформатори з рухомими обмотками (типу ТДМ):** Первинна і вторинна обмотки розташовані на стрижнях музпроводу. Відстань між ними можна змінювати гвинтовим механізмом. Чим більша відстань між обмотками, тим більша частина магнітного потоку розсіюється у повітря (не перетинає вторинну обмотку). Відповідно, індуктивний опір зростає, а зварювальний струм зменшується.

- **Трансформатори з рухомим магнітним шунтом (типу СТШ):** Обмотки нерухомі. Між ними вводиться сталевий пакет — шунт. Чим глибше введений шунт, тим більше магнітних ліній замикається через нього, оминаючи вторинну обмотку, що збільшує індуктивний опір розсіяння та знижує струм.

Трансформатори відзначаються високою надійністю, простотою конструкції та низькою вартістю, однак мають значну масу, низький коефіцієнт потужності ($\cos \phi$) та забезпечують гіршу стабільність дуги порівняно з джерелами постійного струму.

ЛЕКЦІЯ 2. ЗВАРЮВАЛЬНІ ВИПРЯМЛЯЧІ ТА ГЕНЕРАТОРИ (2 години)

2.1. Переваги зварювання на постійному струмі

Зварювання на постійному струмі (DC) має принципові технологічні переваги над змінним струмом (AC):

1. Відсутність переходів струму через нуль забезпечує вищу стабільність горіння дуги та легкість її підпалу.
2. Можливість управління тепловкладенням шляхом вибору полярності. При **прямій полярності (DCEN)** деталь підключається до позитивного полюса (анода), а електрод — до негативного (катода). Оскільки анодна пляма виділяє більше тепла (приблизно 70% теплової енергії дуги), деталь проплавляється глибше. При **зворотній полярності (DCEP)** плюс подається на електрод, що спричиняє його інтенсивне плавлення, зменшуючи глибину проплавлення деталі. Зворотна полярність є стандартом для зварювання MIG/MAG та зварювання тонколистового металу.

2.2. Принципова будова зварювального випрямляча

Зварювальний випрямляч — це статичний апарат, що перетворює змінний струм промислової мережі на постійний (пульсуючий) зварювальний струм.

Класичний випрямляч (типу ВД або ВС) складається з трьох основних блоків:

1. **Силовий знижувальний трансформатор:** Знижує напругу мережі до напруги холостого ходу дуги (зазвичай 60-90 В).
 2. **Випрямний блок (вентильний блок):** Побудований на потужних кремнієвих діодах або тиристорах. Діоди пропускають струм лише в одному напрямку. У промислових апаратах застосовується трифазна мостова схема випрямлення (схема Ларіонова). Вона складається з 6 діодів. Трифазне випрямлення забезпечує дуже низький коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги (близько 5.7%), що робить дугу виключно стабільною.
 3. **Дросель (реактор):** Котушка з товстого мідного дроту на сталевому осердді, включена послідовно в зварювальне коло. Дросель згладжує залишкові пульсації струму та обмежує швидкість наростання струму короткого замикання (di/dt) у момент відриву краплі розплавленого металу. Це кардинально зменшує розбризкування металу.
- Тиристорні випрямлячі (типу ВДУ) є універсальними. Замість некерованих діодів у них застосовуються тиристори. Завдяки зміні кута відкривання тиристорів електронним блоком управління, можна безступінчасто регулювати зварювальний струм, а також формувати як крутопадаючі (для MMA/TIG), так і жорсткі (для MIG/MAG) вольт-амперні характеристики в одному апараті.

2.3. Багатопостові зварювальні системи

На великих машинобудівних підприємствах та суднобудівних заводах економічно недоцільно встановлювати окреме джерело живлення для кожного зварювальника. Застосовуються багатопостові випрямлячі (наприклад, ВДМ-1202).

Принцип дії: Встановлюється один надпотужний випрямляч (струмом 1000-1600 А) із жорсткою ЗВАХ. До нього паралельно підключаються робочі пости (до 6-8 постів). Для формування крутопадаючої характеристики безпосередньо на робочому місці та індивідуального регулювання струму, послідовно з дугою кожного зварювальника підключається **баластний реостат (РБ)** (наприклад, РБ-302).

Баластний реостат — це набір ніхромових або фехралевих пружин з високим омичним опором. Вмикаючи різні секції пружин рубильниками на панелі РБ, зварювальник змінює активний опір кола R_{Σ} . Згідно з законом Ома, зміна опору змінює струм.

Недолік системи: Вкрай низький коефіцієнт корисної дії (ККД). Величезна кількість електричної енергії безповоротно витрачається на нагрівання пружин баластного реостата, виділяючись у повітря у вигляді тепла. В умовах сучасної енергетичної кризи такі системи масово замінюються на індивідуальні інвертори.

2.4. Зварювальні генератори та агрегати

Зварювальний генератор — це електрична машина, що обертається і перетворює механічну енергію обертання якоря на електричну енергію постійного зварювального струму. Генератор приводиться в дію або електричним двигуном (утворюючи зварювальний перетворювач), або

двигуном внутрішнього згоряння — дизельним чи бензиновим (утворюючи зварювальний агрегат типу АДД для роботи в польових умовах при зварюванні трубопроводів).

Колекторні генератори мають колекторно-щітковий вузол, який слугує механічним випрямлячем. Для створення крутопадаючої ЗВАХ застосовуються спеціальні схеми намагнічування. Найпоширеніша — схема генератора з незалежним збудженням та послідовною розмагнічувальною обмоткою. При збільшенні зварювального струму магнітний потік послідовної обмотки діє зустрічно до основного магнітного потоку, розмагнічуючи генератор і викликаючи різке падіння напруги на клеммах.

Сучасні зварювальні агрегати будуються за безщітковою вентильною схемою: двигун обертає ротор синхронного генератора змінного струму, який потім випрямляється блоком потужних діодів. Це значно підвищує надійність апарата.

ЛЕКЦІЯ 3. ІНВЕРТОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИНЕРГЕТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ (2 години)

3.1. Принцип подвійного перетворення енергії (Будова інвертора)

Зварювальні інвертори здійснили технологічну революцію у зварювальному виробництві на початку ХХІ століття. Принцип дії інвертора базується на подвійному перетворенні електричної енергії. Блок-схема класичного інвертора складається з наступних каскадів:

1. **Мережевий випрямляч:** Змінний струм промислової мережі частотою 50 Гц (220 В або 380 В) подається на діодний міст і випрямляється. Електролітичні конденсатори великої ємності згладжують напругу, перетворюючи її на постійну (близько 300 В для однофазної мережі).

2. **Високочастотний інверторний блок:** Постійний струм подається на міст із потужних напівпровідникових ключів — транзисторів **IGBT** (Insulated-Gate Bipolar Transistor) або MOSFET. Електронна плата управління відкриває і закриває ці транзистори з величезною частотою (від 20 кГц до 100 кГц). Таким чином, постійний струм знову перетворюється на змінний, але вже **високочастотний імпульсний струм**.

3. **Високочастотний трансформатор:** Високочастотна напруга (близько 300 В) подається на первинну обмотку знижувального трансформатора. Трансформатор знижує напругу до зварювальної (60-90 В) та багаторазово підвищує струм (до 160-500 А).

4. **Високочастотний випрямляч:** Вихідний змінний струм високої частоти випрямляється швидкодіючими силовими діодами (діодами Шотткі) і через дросель подається на зварювальну дугу.

3.2. Переваги інверторних технологій

Чому високочастотне перетворення настільки важливе? Згідно з законом електромагнітної індукції Фарадея, електрорушійна сила (ЕРС) трансформатора визначається формулою:

$$E = 4.44 \cdot f \cdot w \cdot S \cdot B$$

де f — частота струму, w — кількість витків, S — площа перерізу магнітопровода (сердечника), B — магнітна індукція.

Із формули видно, що при підвищенні частоти f від 50 Гц (в класичному трансформаторі) до 50 000 Гц (в інверторі), необхідна площа перерізу сталевого сердечника S зменшується в сотні разів! Саме тому масивні трансформатори вагою 100-150 кг були замінені на компактні інвертори вагою 5-15 кг при тій самій потужності.

Крім того, інвертори оснащуються модулями **PFC (Power Factor Correction)** — активними коректорами коефіцієнта потужності. Це дозволяє апарату споживати електроенергію з мережі без фазових спотворень ($\cos \phi$ наближається до 0.99), що знижує навантаження на проводку і дозволяє жити потужні інвертори від слабких мереж або генераторів.

3.3. Мікропроцесорне та синергетичне управління

Оскільки транзисторами IGBT керує мікропроцесор, швидкість реакції інвертора на зміну стану дуги вимірюється мікросекундами. Це дозволяє реалізувати програмні функції, недоступні для трансформаторів:

- *Anti-Stick* (Антиприлипання) — при замиканні електрода на деталь процесор за мілісекунди скидає струм до нуля, не даючи електроду розжаритися.
- **Синергетичне управління (Synergic Control):** У традиційному напівавтоматі MIG/MAG зварювальник повинен самостійно і незалежно налаштувати дві ручки: напругу (В) та швидкість подачі дроту (м/хв). Цей процес вимагає високої кваліфікації і тривалого методу "проб і помилок". Синергетика вирішує цю проблему. У пам'ять інвертора зашиті складні математичні алгоритми (Synergic Lines), розроблені інженерами-зварювальниками в лабораторних умовах для всіх комбінацій металів та газів.

Зварювальник на цифровій панелі вказує лише базові вхідні дані:

1. Тип металу (наприклад, Fe, CrNi, AlMg).
2. Діаметр дроту (0.8, 1.0, 1.2 мм).
3. Тип захисного газу (\$CO_2\$, \$Ar/CO_2\$ 82/18).

Після цього зварювальник крутить лише ОДИН регулятор — "товщину металу" або "швидкість подачі дроту". Інвертор автоматично, миттєво і синхронно підбирає ідеальну напругу дуги, індуктивність та форму імпульсу для даної швидкості подачі.

3.4. Імпульсні режими (Pulse, Double Pulse)

Мікропроцесорне управління дозволило створити режим **імпульсного зварювання (Pulse MIG)**. Замість горіння дуги на постійному рівні струму, інвертор генерує струм у вигляді прямокутних імпульсів.

- **Базовий струм (\$I_{\text{баз}}\$):** Низький струм (20-50 А), який просто підтримує горіння дуги, не розплавляючи дріт. Ванна при цьому охолоджується.

- **Піковий струм (\$I_{\text{пik}}\$):** Високий струм імпульсу (300-500 А), який подається на частку секунди. Його енергія розплавляє кінець дроту і формує одну краплю. Сила електромагнітного стиснення (пінч-ефект) "відстрілює" цю краплю в зварну ванну.

Правило Pulse MIG: **Один імпульс = одна крапля**. Це забезпечує струминне перенесення металу абсолютно без бризок навіть при зварюванні алюмінію та дозволяє зварювати тонкий метал (0.8-1.5 мм) без пропалів, оскільки середній струм тепловкладення залишається низьким.

ЛЕКЦІЯ 4. УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МЕХАНІЗОВАНОГО ЗВАРЮВАННЯ В ЗАХИСНИХ ГАЗАХ (MIG/MAG) (2 години)

4.1. Комплектація зварювального напівавтомата

Механізоване зварювання плавким електродом у середовищі інертних (MIG - Metal Inert Gas) або активних (MAG - Metal Active Gas) газів є найпоширенішим способом зварювання в сучасному машинобудуванні.

Стандартний зварювальний пост MIG/MAG складається з:

1. Джерела живлення із жорсткою ЗВАХ.
2. Механізму подачі зварювального дроту (МПД).
3. Зварювального пальника з кабель-шланговим пакетом.
4. Газобалонного обладнання (балон з газом, редуктор, ротаметр, газовий шланг, підігрівач газу).
5. Зворотного кабелю (маси) з клемою.
6. Системи охолодження пальника (при високих струмах).

4.2. Механізми подачі зварювального дроту

Головне завдання МПД — рівномірна і безперебійна подача дроту з котушки в зону зварювання.

За кінематичною схемою МПД бувають:

- **Двороликові (2R):** Один ролик (нижній) є привідним, отримує обертання від електродвигуна постійного струму через шестеренчастий редуктор. Верхній ролик — притискний, встановлений на відкидному важелі з пружиною. Застосовується для сталевих дроту діаметром до 1.2 мм при коротких пальниках (до 3 метрів).

- **Чотирироликові (4R):** Мають два привідних нижніх ролики і два верхніх притискних, з'єднаних зубчастою передачею. Забезпечують потужне зчеплення з дротом без його зминання. Обов'язкові для зварювання алюмінієвим дротом, порошковими дротами та при використанні довгих пальників (4-5 метрів).

Профіль канавки подавальних роликів жорстко регламентується типом дроту:

- **V-подібний гладкий паз:** для твердого сталевго або нержавіючого дроту суцільного перерізу.
- **U-подібний гладкий паз:** для м'якого алюмінієвого дроту (AlMg, AlSi). U-подібний паз запобігає деформації (сплюсцуванню) м'якого алюмінію при стисканні, що унеможливорює його заклинювання в пальнику.
- **V-подібний паз із насічкою (Knurled):** для порошкових дротів (FCAW). Порошковий дріт являє собою тонку сталеву трубку, заповнену порошком (флюсом). Гладкий ролик може розчавити трубку, тому використовують ролик із зубами, який "вгризається" в оболонку, протягуючи дріт при мінімальному зусиллі притискання.

За розташуванням приводу системи подачі класифікують на:

- **Штовхаючі (Push):** МПД розташований в корпусі апарата і "штовхає" дріт через направляючий канал пальника. Максимальна довжина пальника обмежена втратою стійкості дроту на стиск (до 5 метрів).
- **Тягнучо-штовхаючі (Push-Pull):** Окрім основного мотора в апараті, безпосередньо в руків'ї пальника встановлено мініатюрний пневматичний або електричний мікродвигун, який "тягне" дріт на себе. Ця система розроблена спеціально для зварювання алюмінію та дозволяє використовувати кабель-шлангові пакети довжиною до 10 метрів.

4.3. Конструкція зварювального пальника MIG/MAG

Зварювальний пальник слугує для підведення до дуги зварювального струму, подачі дроту та захисного газу. Елементи пальника (від рукоятки до сопла):

1. **Кабель-шланговий пакет:** гнучкий рукав, усередині якого проходять силовий мідний кабель (або мідна оплітка), трубка для подачі газу, дроти керування від кнопки та направляючий канал для дроту.
2. **Направляючий канал (Liner):** Для сталевих дротів використовується сталева вита спіраль. Для алюмінієвих дротів застосування сталевго спіралі суворо заборонено (вона забруднює алюміній залізом і дряпає його). Для алюмінію застосовують виключно тефлонові, поліамідні або карбон-тефлонові направляючі канали.
3. **Гусак (Swan Neck):** Вигнута металева трубка, вкрита ізоляцією, що формує ергономічний кут нахилу пальника (зазвичай 45° або 60°).
4. **Газорозподільник (Дифузор):** Латунна або керамічна деталь із бічними отворами. Призначена для рівномірного та ламінарного витікання захисного газу у сопло.
5. **Струмознімний наконечник (Contact Tip):** Ключовий витратний елемент, виготовлений із високоякісної міді або хромоцирконієвих сплавів (CuCrZr). Через наконечник струм безпосередньо передається на рухомий зварювальний дріт в останній момент перед виходом у дугу. Внутрішній діаметр наконечника має строго відповідати діаметру дроту (наприклад, наконечник 1.0 для дроту 1.0).
6. **Газове сопло:** Мідна або латунна циліндрична/конічна насадка, що спрямовує струмінь захисного газу в зону зварювання.

4.4. Системи охолодження устаткування

При зварюванні струмами понад 250-300 А пальник піддається екстремальному термічному навантаженню від випромінювання дуги та проходження високого струму через кабель. Пальники поділяються на:

- **Пальники з повітряним охолодженням:** Охолоджуються потоком захисного газу, що проходить всередині, та навколишнім повітрям. Застосовуються для зварювання на малих та середніх струмах (до 250 А при ТВ=60%).

- **Пальники з рідинним (водяним) охолодженням:** Обов'язкові для зварювання на струмах 300-500 А, особливо при зварюванні алюмінію (MIG). У кабель-шланговому пакеті проходять додаткові шланги подачі та повернення охолоджувальної рідини (антифризу). Рідина циркулює по внутрішніх каналах гусака пальника, охолоджуючи струмознімний наконечник і сопло.

Циркуляція забезпечується **блоком автономного охолодження (Чилером / Cooler)**, який встановлюється під зварювальним інвертором. Чилер складається з резервуара для антифризу, радіатора з вентилятором, потужної водяної помпи (насоса) та реле потоку рідини, яке миттєво відключає зварювальний апарат, якщо циркуляція рідини припиняється, щоб запобігти розплавленню кабелю пальника.

ЛЕКЦІЯ 5. УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ (TIG) ТА МІКРОПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ (2 години)

5.1. Специфіка джерел живлення для TIG-зварювання

Аргонодугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом (TIG — Tungsten Inert Gas, або GTAW — Gas Tungsten Arc Welding) вимагає особливого підходу до генерування електричної енергії. Для забезпечення стабільного проплавлення металу незалежно від коливань довжини дуги, які неминуче виникають через мікрорухи руки зварювальника, джерело живлення повинно мати **крутопадаючу (або вертикальну) зовнішню вольт-амперну характеристику (ЗВАХ)**. У такому разі, навіть при значній зміні напруги на дузі, зварювальний струм залишається практично незмінним, що гарантує сталу теплову потужність.

5.2. Системи безконтактного підпалу (Осцилятори)

Критичною проблемою TIG-зварювання відповідальних конструкцій (наприклад, посудин під тиском) є заборона контактного підпалу дуги (торкання вольфрамом виробу). Контактний підпал (Scratch start) призводить до обламування мікрочастинок вольфраму, які залишаються у зварній ванні у вигляді тугоплавких включень, що є неприпустимим дефектом за нормами ISO 5817.

Для вирішення цієї проблеми устаткування оснащується **високочастотним осцилятором (HF Ignition)**. Осцилятор — це іскровий генератор, який перетворює струм промислової частоти у струм високої напруги (2000–6000 В) та високої частоти (150–500 кГц).

Принцип дії: При натисканні кнопки на пальнику осцилятор генерує високовольтний імпульс, який пробиває повітряний (газовий) проміжок між електродом і деталлю без їх фізичного контакту. Після виникнення основної зварювальної дуги осцилятор автоматично відключається (при зварюванні на постійному струмі DC) або переходить у режим стабілізатора (при зварюванні на змінному струмі AC).

5.3. Устаткування для TIG-AC (зварювання алюмінію)

Зварювання алюмінієвих та магнієвих сплавів вимагає руйнування тугоплавкої оксидної плівки ($\text{\$Al}_2\text{\$O}_3\text{\$}$, температура плавлення $\text{\$2050^\circ\text{C}\$}$). Ця плівка руйнується явищем "катодного розпилення", коли деталь є катодом (мінус), а електрод — анодом (плюс). Однак при такій полярності вольфрамовий електрод миттєво перегрівається і плавиться.

Для вирішення цього суперечливого завдання застосовують **зварювання на змінному струмі (TIG-AC)** прямокутної форми (Square Wave). Сучасні інвертори дозволяють електронним шляхом регулювати **баланс напівхвиль змінного струму (AC Balance)**:

- *Позитивна напівхвиля (Електрод "+"):* забезпечує катодне очищення (руйнування оксиду), але нагріває електрод.

- *Негативна напівхвиля (Електрод "-")*: забезпечує глибоке проплавлення металу та охолодження електрода.

Зварювальник за допомогою мікропроцесорної панелі налаштовує баланс (наприклад, 30% часу — позитивна напівхвиля для очищення, 70% — негативна для проплавлення), що є ключовим параметром при розробці індивідуальної технологічної частини дипломного проекту.

5.4. Пальники TIG та вольфрамові електроди

Конструкція TIG-пальника суттєво відрізняється від MIG/MAG. Він складається з: руків'я, цангового затискача, мідної цанги (для фіксації вольфраму та передачі струму), каппи (довгої або короткої) та керамічного газового сопла (Gas Lens).

Використання **газової лінзи (Gas Lens)** — спеціального сітчастого дифузора — є обов'язковим для зварювання титану та легованих сталей, оскільки воно перетворює турбулентний потік аргону на ламінарний (рівний), що збільшує зону ефективного захисту ванни вдвічі.

Вибір вольфрамових електродів строго регламентується:

- *Чистий вольфрам (Зелений, WP)*: використовується рідко, переважно для змінного струму.
- *Торійований (Червоний, WT-20)*: універсальний, але має альфа-радіоактивне випромінювання. При його заточуванні необхідна сувора охорона праці (витяжка радіоактивного пилю).
- *Лантанований (Золотистий/Синій, WL-15, WL-20)*: безпечна, екологічна та ефективна альтернатива торію, що витримує високі струмові навантаження.

5.5. Устаткування для плазмового та мікроплазмового зварювання (PAW)

Плазмове зварювання (Plasma Arc Welding) — це еволюція TIG-процесу. Головна відмінність плазмотрона полягає у наявності водоохолоджуваного мідного сопла, яке механічно, термічно та електромагнітно стискає зварювальну дугу.

Ефекти стиснення: Температура плазми зростає до $\$15\,000 - 30\,000^{\circ}\text{C}$. Дуга набуває циліндричної (кинджальної) форми, що дозволяє зварювати метали товщиною до 10-15 мм за один прохід без розробки кромок (режим "зануреної дуги" або Keyhole).

Устаткування складається з джерела живлення, плазмотрона та **консолі управління газами**. До плазмотрона підводяться два незалежні потоки газу:

1. *Плазмоутворюючий газ (найчастіше чистий Аргон)*: подається безпосередньо у внутрішню камеру до вольфрамового електрода з невеликою витратою (0.5 - 3 л/хв). Він іонізується і утворює плазмовий струмінь.

2. *Захисний газ (Аргон, Гелій або їх суміші)*: подається через зовнішнє керамічне сопло з великою витратою (10 - 20 л/хв) для захисту зварної ванни від атмосферного повітря.

Для надійного старту плазмотрон використовує **чергову дугу (Pilot Arc)** — малопотужну дугу (5-15 А), яка постійно горить між вольфрамовим електродом (катодом) та мідним соплом плазмотрона (анодом) всередині пальника. При наближенні до деталі та натисканні кнопки загоряється основна (робоча) дуга між електродом і деталлю.

ЛЕКЦІЯ 6. АВТОМАТИЧНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ (SAW) (2 години)

6.1. Загальна характеристика та переваги методу SAW

Зварювання під флюсом (Submerged Arc Welding - SAW) — це високопродуктивний процес автоматичного дугового зварювання, при якому дуга горить між безперервним голим плавким електродом (дротом) і зварювальною ванною під товстим шаром гранульованого флюсу.

Флюс виконує кілька критичних функцій: розплавляючись, він утворює газошлакову бульбашку, яка ідеально захищає ванну від кисню та азоту; металургійно розкислює та легує метал; утворює шлакову кірку, що уповільнює охолодження шва (відпал); повністю поглинає

ультрафіолетове випромінювання дуги та бризки, що робить цей процес найбільш ергономічним та безпечним з точки зору охорони праці.

Процес SAW працює на екстремально високих струмах (від 300 до 2000 Ампер і вище). Висока густина струму призводить до глибокого проплавлення основного металу (частка основного металу у шві сягає 60-70%). Відповідно, устаткування для SAW є масивним, високопотужним та потребує надійної механізації.

6.2. Класифікація автоматичного зварювального устаткування

За ступенем автономності переміщення автомати для зварювання під флюсом поділяються на:

1. **Зварювальні трактори (самохідні автомати):** Мобільні пристрої візкового типу, які переміщуються безпосередньо по виробу або по спеціальній легкій напрямній рейці (колії), прокладеній паралельно до стику. Переваги: мобільність, можливість зварювати довгі прямолінійні та кільцеві шви (якщо виріб обертається на роликовому стенді). Приклади: ТС-17, АДС-1000, сучасні трактори ESAB A2 Multitrac.

2. **Підвісні зварювальні головки (стаціонарні автомати):** Не мають власного ходового механізму (візка). Головка монтується стаціонарно на зварювальній колоні, порталі або спеціальному маніпуляторі. Переміщення дуги відносно стику забезпечується або рухом самої колони по рейках, або рухом виробу під нерухомою головою (наприклад, труба на конвеєрі).

6.3. Будова та кінематика зварювального трактора

Сучасний зварювальний трактор (наприклад, популярної серії для суднобудування та мостобудування) є складним електромеханічним комплексом, що складається з таких вузлів:

- **Ходовий візок:** Обладнаний електродвигуном постійного струму або кроковим двигуном з черв'ячним редуктором. Механізм зчеплення (муфта) дозволяє відключати привід для ручного перекочування трактора. Швидкість зварювання ($V_{\text{зв}}$) регулюється плавно зміною обертів двигуна.
- **Механізм подачі дроту (Зварювальна головка):** Потужний редукторний вузол, що протягує дріт великого діаметра (від 2.0 до 6.0 мм) з касети (вагою 25-30 кг). Привід подачі є критичним вузлом, оскільки від стабільності швидкості подачі ($V_{\text{п}}$) залежить стабільність дуги.
- **Мундштук (Струмопідвід):** Масивний мідний вузол ковзного контакту. Оскільки струми сягають 1000 А, надійний контакт між мідними губками та рухомим сталевим дротом є проблемою. Мундштуки мають системи підтискання та пружні струмознімні наконечники.
- **Механізми просторового коригування:** Система супортів (гвинтових передач) для точного наведення мундштука на вісь стику по вертикалі та горизонталі. У сучасних тракторах ці супорти моторизовані та керуються джойстиком.
- **Флюсова апаратура:** Бункер місткістю 10-15 кг флюсу з шибєрною заслінкою для дозування подачі флюсу попереду дуги.

6.4. Системи саморегулювання дуги (Електричні принципи)

Для підтримки сталої довжини дуги при зварюванні (якщо поверхня металу нерівна) в автоматах реалізовано дві принципово різні системи:

1. **Автомати із залежною швидкістю подачі дроту (Система регулювання за напругою дуги):** Використовується джерело живлення з **крутопадаючою ЗВАХ**. Двигун подачі дроту має електричний зворотний зв'язок з напругою дуги. Якщо дуга подовжується (напруга зростає) $\rightarrow$ автоматика прискорює мотор подачі дроту $\rightarrow$ дріт подається швидше і дуга скорочується до норми. Якщо дуга коротшає $\rightarrow$ швидкість подачі зменшується. Ця система класична, але має певну механічну інерційність.

2. **Автомати з незалежною (сталою) швидкістю подачі дроту (Система саморегулювання):** Використовується джерело живлення з **жорсткою або пологозростаючою ЗВАХ**. Швидкість подачі дроту задається жорстко і не змінюється в процесі зварювання. Ефект стабілізації відбувається суто електричним шляхом: якщо дуга

випадково скорочується, струм у колі миттєво зростає (згідно з жорсткою ЗВАХ), виділяється величезна теплова потужність, яка швидко розплавляє дріт, відновлюючи довжину дуги. Ця система не має механічної інерції і реагує за мілісекунди. Сучасне обладнання (тонкі дроти до 3 мм) працює переважно за цим принципом.

6.5. Флюсоапарати та пневматичні системи рекуперації

У процесі зварювання лише 30-40% насипаного флюсу розплавляється і перетворюється на шлакову кірку. Решта 60-70% флюсу залишається незмінною. Залишати його на деталі економічно недоцільно (вартість флюсу є значною складовою економічної частини дипломного проєкту).

Для збирання невикористаного флюсу безпосередньо в процесі зварювання трактори обладнуються **системами рекуперації (Flux Recovery Systems)**. Це спеціалізовані промислові пилососи ежекторного типу, які працюють від магістралі стисненого повітря цеху (0.4 - 0.6 МПа). Всмоктувальне сопло розташовується позаду мундштука (за зоною формування шлаку). Відпрацьований флюс всмоктується, проходить через циклонний сепаратор (де відокремлюється дрібний пил та шматочки шлаку), і чистий придатний флюс автоматично повертається назад у робочий бункер трактора. Це кардинально підвищує рентабельність процесу.

ЛЕКЦІЯ 7. МЕХАНІЧНЕ, СКЛАДАЛЬНЕ ТА ДОПОМІЖНЕ ОБЛАДНАННЯ (2 години)

7.1. Призначення та класифікація механічного обладнання

Зварювальне виробництво характеризується тим, що час безпосереднього горіння дуги (машинний час) часто становить лише 20-30% від загального часу виготовлення конструкції. Решта 70-80% — це допоміжний час: розмітка, встановлення деталей, прихвачування, перекантування виробу, зачищення швів. Розрахунок цих часових витрат є ключовим етапом Економічної частини кваліфікаційної роботи.

Головне завдання механічного обладнання — кардинальне зменшення допоміжного часу (підвищення продуктивності), забезпечення геометричної точності (взаємозамінності) конструкцій та переведення всіх зварних швів у зручне **нижнє просторове положення (РА)**, де зварювальник може працювати з максимальною швидкістю струмами великої величини.

Обладнання поділяють на три великі групи:

1. Обладнання для складання та фіксації (збірно-зварювальні кондуктори, стенди).
2. Обладнання для переміщення та позиціонування виробу (кантувачі, маніпулятори, роликові опори).
3. Обладнання для переміщення зварювального апарату (колони, портали, каретки).

7.2. Складально-зварювальні кондуктори та притискні механізми

Кондуктор (Welding Jig) — це жорсткий металевий пристрій, призначений для точного просторового базування деталей, їх жорсткого закріплення (затискання) та утримання в процесі зварювання з метою запобігання термічним деформаціям (коробленню).

Основа кондуктора — масивна рама (плита), яка протистоїть зварювальним напруженням. На рамі монтуються:

- *Базуючі елементи:* упори, пальці, призми, які забезпечують точне положення деталі в просторі (позбавлення 6-ти ступенів свободи).
- *Притискні елементи (Затискачі):* створюють силове зусилля, що притискає деталь до баз.

Типи затискних механізмів:

- **Гвинтові:** Найпростіші (струбцини), забезпечують велике зусилля, але вкрай повільні в роботі.
- **Важільно-ексцентрикові (Quick-Release Clamps):** Працюють за принципом системи важелів. Фіксація відбувається одним швидким рухом рукоятки (перехід через мертву точку забезпечує самогальмування). Дуже популярні в серійному виробництві легких конструкцій.

- **Пневматичні (Pneumatic Cylinders):** Найбільш досконалі для масового виробництва (наприклад, в автомобільній промисловості). Працюють від стисненого повітря (0.4-0.6 МПа). Забезпечують миттєве затискання одразу десятків точок при натисканні однієї кнопки. Проектування пневматичних затискачів передбачає розрахунок площі поршня для створення необхідного зусилля $F = P \cdot S$. Гідравлічні притиски (працюють на мастилі під тиском до 10-20 МПа) використовуються для екстремально великих зусиль (наприклад, притискання полиць двотаврової балки до стінки товщиною 40 мм).

7.3. Обладнання для зміни просторового положення виробу

Коли виріб зібрано і зафіксовано, його часто потрібно перевернути, щоб усі шви варилися в нижньому положенні.

- **Позиціонери:** Забезпечують обертання виробу навколо однієї нерухомої (або з нахилом, що регулюється вручну) осі.
- **Кантувачі (Rotators / Turnovers):** Здійснюють обертання (перекантування) виробу навколо горизонтальної осі. Бувають двостійкові (деталь кріпиться в центрах двох бабок, одна з яких привідна), ланцюгові (для рам, балок, деталь висить у петлях ланцюгів) та важільні (книжкові).
- **Зварювальні маніпулятори:** Найбільш універсальне обладнання. Маніпулятор має планшайбу (круглий стіл з Т-подібними пазами), на яку кріпиться деталь. Планшайба має два ступені свободи (два незалежні електроприводи): вона може обертатися навколо своєї осі зі зварювальною швидкістю (для виконання кільцевих швів) та плавно нахилитися на кут до 135° (для переведення кутового шва у положення "в човник").
- **Роликові стенди (Turning Rolls):** Використовуються виключно для роботи з тілами обертання (трубами, циліндричними резервуарами, котлами). Виріб кладеться на гумові або поліуретанові ролики. Один блок роликів є привідним (обертається від мотор-редуктора), інший — холостим. Змінюючи відстань між роликами, можна зварювати ємності від 0.5 до 5 метрів у діаметрі.

7.4. Обладнання для переміщення зварювального апарату

Якщо деталь обертається на роликовому стенді або маніпуляторі, зварювальну головку (автомат SAW або пальник MIG) необхідно жорстко зафіксувати над стиком і точно позиціонувати. Для цього слугують:

- **Зварювальні колони (Column & Boom):** Масивна вертикальна стійка, по якій вгору-вниз (вісь Z) переміщується каретка. На каретці закріплена горизонтальна консоль (стріла), яка висувається вперед-назад (вісь X). На кінці консолі кріпиться зварювальна головка. Це дозволяє доставити дугу у будь-яку точку простору або завести головку всередину довгої труби для зварювання внутрішнього шва.
- **Зварювальні портали (Gantry Systems):** П-подібна конструкція, що рухається по рейках над масивною деталлю (наприклад, мостовим прогоном або боковиною вагона). Дозволяє нести одразу кілька зварювальних головок для паралельного виконання довгих прямолінійних швів.
- **Зварювальні каретки (Tractors/Carriages):** Компактні механізми (вагою 5-10 кг), що кріпляться на магнітних або вакуумних присосках безпосередньо до деталі (або до гнучкої зубчастої рейки) і самостійно "повзуть" вздовж шва зі стабільною швидкістю, тримаючи в затискачі звичайний пальник MIG/MAG. Це ідеальне рішення для механізації довгих стиків у суднобудуванні, де використання великих порталів неможливе.

ЛЕКЦІЯ 8. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ (РТК) У ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ (2 години)

8.1. Поняття комплексної автоматизації та Індустрія 4.0

Сучасний етап розвитку машинобудування переходить від жорсткої автоматизації (спеціалізовані верстати під одну деталь, які складно переналаштувати) до **гнучких**

виробничих систем (ГВС) та роботизації. Концепція **Індустрія 4.0** передбачає повну цифровізацію цеху, де зварювальні джерела живлення, роботи-маніпулятори, позиціонери та системи контролю якості об'єднані в єдину локальну мережу підприємства. Майстер або технолог може зі свого комп'ютера бачити в режимі реального часу параметри дуги на кожному робочому місці, статистику витрат дроту, газу та електроенергії (що автоматично формує звіти для економічної частини виробництва).

8.2. Будова антропоморфного зварювального робота

Робототехнічний комплекс (РТК) для дугового зварювання складається з:

1. **Маніпулятора (Robot Arm):** Найчастіше це 6-осьовий антропоморфний маніпулятор (наприклад, Yaskawa Motoman, KUKA, FANUC). Він імітує рухи людської руки: має "плече", "лікоть", "зап'ястя". 6 ступенів свободи (осей) дозволяють підвести зварювальний пальник до будь-якої точки простору під будь-яким заданим кутом. Привід осей здійснюється високоточними сервомоторами з хвильовими редукторами.
2. **Контролера (Controller):** "Мозок" робота — потужний промисловий комп'ютер, який керує сервоприводами, розраховуючи математичну кінематику траєкторії руху **TCP (Tool Center Point — Центральна точка інструмента)**. Контролер безпосередньо зв'язаний із цифровим зварювальним інвертором по високошвидкісних цифрових шинах (наприклад, DeviceNet, EtherCAT).
3. **Пульт програмування (Teach Pendant):** Переносний планшет з джойстиком, екраном та кнопками. Програміст використовує його для навчання робота: підводить пальник до початку шва, запам'ятовує точку, підводить до кінця шва — запам'ятовує. Робот автоматично будує лінійну або кругову інтерполяцію (траєкторію) між цими точками.
4. **Зварювального обладнання:** Інвертор, блок водяного охолодження, інтегрований механізм подачі дроту (часто розміщений прямо на третій осі робота для зменшення довжини каналу) та спеціальний роботизований пальник із системою захисту від зіткнень (Crash Sensor). При ударі пальника об деталь, датчик за мілісекунди зупиняє робота, запобігаючи поломці механіки.

8.3. Сенсорні системи та відстеження стику (Seam Tracking)

Головна проблема роботизації дугового зварювання — це відхилення реальної геометрії деталі від ідеальної 3D-моделі (допуски на штампування, неточне складання в кондукторі) та термічні деформації ("відведення" металу при нагріванні). Якщо робот просто поїде по заздалегідь запрограмованій сліпій траєкторії, дуга зійде зі стику, і виникне непровар.

Щоб зробити робота "зрячим", використовують сенсорні системи:

- **Тактильні щупи (Touch Sensing):** Перед запалюванням дуги робот використовує сам зварювальний дріт (або газове сопло) як щуп. На дріт подається безпечна напруга (близько 40 В). Робот повільно рухається до деталі, торкається її (замикання кола) і записує реальну координату поверхні. Зробивши кілька дотиків (пошук кута), робот математично зсуває всю програму зварювання в реальне просторове положення деталі.
- **Відстеження через дугу (Through-the-Arc Seam Tracking, TAST):** Під час зварювання робот здійснює поперечні коливання пальника (Weaving) вліво-вправо. Інвертор постійно вимірює силу струму. Оскільки при наближенні до стінки (у кутовому шві) виліт дроту зменшується, струм зростає. Аналізуючи ці коливання струму 100 разів на секунду, контролер обчислює центр стику і автоматично коригує траєкторію на льоту. Це ідеальне рішення для товстих металів та зварювання MAG.
- **Лазерний технічний зір (Laser Vision Tracking):** Найсучасніша система. Попереду пальника встановлено лазерний сканер. Він проєктує лазерну лінію на стик, камера зчитує викривлення цієї лінії, і комп'ютер будує 3D-профіль шва. Робот миттєво коригує траєкторію, а також може автоматично змінювати швидкість подачі дроту, якщо бачить, що зазор став ширшим (адаптивне заповнення ванни).

8.4. Охорона праці при експлуатації РТК (Trauma-Informed Approach)

Промислові роботи несуть серйозну загрозу життю та здоров'ю людини через величезну швидкість переміщення (до 2-3 м/с) та непередбачуваність для непередбаченого працівника. Сучасний інженерний підхід до проектування роботизованих комірок (Robot Cell) вимагає суворого дотримання протоколів безпеки (Safety Standards):

- Робоча зона роботи повинна бути повністю огорожена глухим парканом висотою не менше 2 метрів, що додатково захищає цех від ультрафіолетового випромінювання дуги та бризок (що особливо важливо для зниження сенсорного навантаження на інший персонал цеху).
- Вхід у зону здійснюється лише через двері, обладнані **електромеханічними замками безпеки (Interlocks)**. При відкритті дверей робот миттєво знеструмлюється.
- Зони завантаження/вивантаження деталей (де оператор взаємодіє з поворотним столом) захищаються **світловими бар'єрами (Light Curtains)** або лазерними сканерами підлоги. Перетин рукою променя світлового бар'єру викликає екстрену зупинку системи (E-Stop).
- Пульти програмування обладнаний 3-позиційною кнопкою згоди (Dead-man switch). Програмування можливе лише якщо інженер злегка утримує цю кнопку в середньому положенні. У разі паніки (різке стискання кнопки) або втрати свідомості (відпускання кнопки) робот миттєво блокується. Це ключовий елемент ергономічної та травмо-безпечної експлуатації надскладного технологічного устаткування.