

---

Т.П. Павленко  
О.М. Петренко  
Н.П. Лукашова

# ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ



Т.П. Павленко  
О.М. Петренко  
Н.П. Лукашова

# ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ

## КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для магістрів усіх форм навчання за спеціальністю  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»)*

Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2018

**Павленко Т. П.** Електротехнологічні установки : конспект лекцій для магістрів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Т. П. Павленко, О. М. Петренко, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 130 с.

Автори:

д-р техн. наук, проф. Т. П. Павленко,  
канд. техн. наук, доц. О. М. Петренко,  
асист. Н. П. Лукашова

Рецензент

**К. М. Василів**, доктор технічних наук, професор кафедри електроенергетики та систем управління (Інститут енергетики та систем керування Національного університету «Львівська політехніка»)

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 10 від 20.03.2018.*

© Т. П. Павленко, О. М. Петренко,  
Н. П. Лукашова, 2018  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК.....	7
1.1 Класифікація електротехнологічних процесів і установок.....	7
1.2 Електротермічні установки нагрівання опором.....	8
1.3 Класифікація нагрівальних печей та їхні особливості.....	10
1.4 Установки прямого нагрівання.....	16
1.5 Електрообладнання та регулювання параметрів печей опору.....	20
2 НАГРІВАННЯ ОПОРОМ РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ.....	23
2.1 Електронагрівальні установки.....	23
2.2 Електрошлакові установки.....	25
2.3 Установки електроопалення та електрообігрівання.....	28
3 ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ.....	31
3.1 Загальні принципи індукційного нагрівання.....	31
3.2 Індукційні плавильні печі.....	33
3.3 Індукційні нагрівальні установки.....	40
3.4 Установки діелектричного нагрівання.....	43
4 ЕЛЕКТРИЧНІ ДУГОВІ ПЕЧІ.....	45
4.1 Властивості дугового розряду.....	45
4.2 Загальні відомості про дугові електричні печі та їхня класифікація.....	46
4.3 Головні елементи дугових печей змінного струму.....	47
4.4 Технології плавлення сталі в дугових печах.....	51
4.5 Дугові печі непрямої дії.....	56
5 ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ.....	61
5.1 Класифікація електрозварювальних установок.....	61
5.2 Класифікація зварювальних дуг та їхні характеристики.....	63
5.3 Джерела живлення зварювальної дуги.....	64
5.4 Зварювальні трансформатори.....	67
5.5 Зварювальні випрямлячі.....	70

5.6	Зварювальні генератори постійного струму.....	75
5.7	Контактні електрозварювальні установки.....	78
5.8	Електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання.....	85
5.9	Електрозварювальні установки як приймачі електричної енергії.....	88
6	ЕЛЕКТРОЛІЗНІ УСТАНОВКИ.....	91
6.1	Електролізні установки для отримання чистих металів та газів.....	92
6.2	Електролізні установки з розплавлених сполук солей і газів.....	93
6.3	Джерела живлення електролізних установок.....	98
6.4	Електролізні установки гальванотехніки.....	94
6.5	Джерела живлення для електролізних установок гальванотехніки.....	101
6.6	Електролізні установки як приймачі електричної енергії.....	103
7	ЕЛЕКТРОННО-ІОННІ УСТАНОВКИ.....	105
7.1	Електронно-іонні установки газоочищення (електрофільтри).....	105
7.2	Електронно-іонні установки електросепарації сипучих сумішей.....	107
7.3	Електронно-іонні установки для електрофарбування.....	109
7.4	Електронно-іонні установки для електродруку.....	110
8	УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ.....	114
8.1	Особливості та принцип дії установок для обробки металів.....	114
8.2	Установки для електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті.....	115

8.3	Установки для розмірної електрохіміко-гідравлічної обробки....	119
8.4	Установки для розмірної електрохіміко-механічної обробки.....	123
8.5	Установки для електрохімічної обробки як приймачі електричної енергії.....	127
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	130

## ВСТУП

Розвиток електротехнологічних процесів забезпечується енергетикою, що розвивається, будівництвом нових електростанцій, спорудженням потужних ліній електропередач.

Установки, в яких відбувається перетворення електричної енергії в інші види з одночасним здійсненням технологічних процесів, називаються електротехнологічними. Ці установки мають досить складне обладнання, що включає робочий орган – електродні системи дугових та іонних агрегатів, специфічні джерела живлення, а також обладнання, що використовується для ремонту електричного транспорту.

Різноманітність технологічних процесів призвело до широкого їх використання в промисловості, транспорті, побуті.

Крім базового обладнання, що використовується в технологічних процесах, входить допоміжне обладнання, яке підтримує системи забезпечення водою, газом, а також підтримують деякі складні технологічні процеси, обумовлені з випуском коштовних виробів і роботою спеціального персоналу. Тому правильний монтаж, налагодження та експлуатація комплексного обладнання без знання технологічного процесу, що виконується, практично неможливо.

На сьогодні робота електротехнологічних установок відбувається в автоматичних режимах, які підтримуються за допомогою мікропроцесорної техніки.

Удосконалення електротехнології призвело до створення матеріалів, що володіють новими властивостями, а саме: більш високою міцністю, термостійкістю, стійкістю до агресивної дії хімічних реакцій і мають високі електроізоляційні властивості й низьку теплопровідність.

Цей курс лекцій рекомендований для студентів електротранспортних, електротехнічних, електромашинобудівних напрямлень всіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка і присвячений вивченню головних положень використання електротехнологічних установок на транспорті під час його виготовлення та ремонту, та в промисловості під час використання технологічних процесів.

# 1 ОГЛЯД ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК

- 1.1 Класифікація електротехнологічних процесів і установок.
- 1.2 Електротермічні установки нагрівання опором.
- 1.3 Класифікація нагрівальних печей та їхні особливості.
- 1.4 Установки прямого нагрівання.
- 1.5 Електрообладнання та регулювання параметрів печей опору.

## 1.1 Класифікація електротехнологічних процесів і установок

Науково-технічний прогрес на рубежі ХХ–ХІ ст. визначається розвитком високих технологій, які забезпечують, з одного боку, отримання нових матеріалів і виробів, а з іншого – зниження енерго- та ресурсовитрат, підвищення екологічних показників виробництва.

Значне місце із-поміж нових технологій займають електротехнології, що обумовлюється з різноманіттям електрофізичних, електрохімічних ефектів, які лежать в їхній основі, простотою контролю та керування електротехнологічними процесами, можливістю їх комплексної автоматизації.

До електротехнологічних належать процеси, що засновані на перетворенні, безпосередньо в робочій зоні технологічних установок, енергії електричного струму, електричного та магнітного полів у теплову, хімічну або механічну енергії, за допомогою яких реалізується заданий процес. Традиційно виокремлюють п'ять груп електротехнологічних процесів (рис. 1.1)

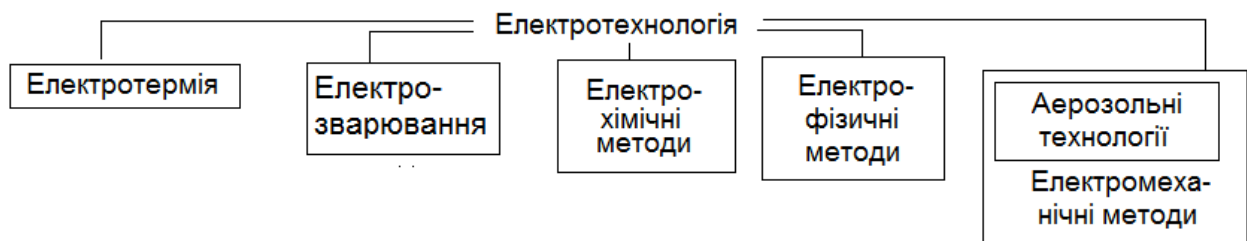


Рисунок 1.1 – Класифікація електротехнологічних процесів

Отже, електротехнологічними установками далі називаються установки, у яких електрична енергія перетворюється в інші види енергії з одночасним виконанням технологічного процесу. Розширена класифікація ЕТУ наведена на рисунку 1.2.

*Електротермічні установки* – це установки, в яких електрична енергія перетворюється в теплову і слугує для нагрівання матеріалів і виробів. В електротермічних установках перетворення енергії проводиться такими способами: нагрівання опором; індукційним нагрівом; діелектричним нагрівом; дуговим нагрівом; електронно та іонно-променевим нагрівом; плазмовим нагрівом; лазерним нагрівом.



В електрохімічних та електрофізичних установках використовується електрохімічна дія струму. До таких установок належать: електролізні; електрохімічні; електроерозійні; електрохіміко-механічні установки.



Рисунок 1.2 – Класифікація електротехнологічних установок

В електромеханічних установках дія електричного струму призводить до деяким механічним зусиллям. До них належать: магнітно-імпульсні; електромагнітні; електрогідрравлічні; ультразвукові.

*Електрокінетичні установки* – установки, в яких використовується електронноіонна технологія, що включає в себе: електризацію речовини, формування руху зарядів в електричному полі тощо. Розвиток одержали такі види установок. *Електрогазоочищення* – виділення з газового (повітряного) потоку твердих тіл або рідких частинок. *Електросепарація* – розділення багатокомпонентних систем на складники. *Електрозабарвлення* – нанесення твердих або рідких покриттів на вироби тощо.

## 1.2 Електротермічні установки нагрівання опором

До електротермічних установок нагрівання опором належать різноманітні печі, що використовуються для обробки металів (рис. 1.3). Нагрівання опором відбувається внаслідок виділення теплоти в матеріалі під час протікання по ним електричного струму. Цей вид нагріву заснований на законі Джоуля-Ленца. Виділяється в провіднику теплова енергія ( $Q$ , ккал), яка пропорційна до квадрату сили струму ( $I$ , А), опору провідника ( $R$ , Ом) і часу протікання струму ( $t$ , с):

$$Q = 0,000\ 24 I^2 \cdot R \cdot t. \quad (1.1)$$



Рисунок 1.3 – Електротермічні установки нагрівання опором

Активна потужність ( $P$ , Вт), що виділяється під час протікання струму в провіднику:

$$P = U^2 R = \frac{U^2 S}{\rho \cdot l}, \quad (1.2)$$

де  $U$  – напруга, В;

$S$  – площа перерізу провідника,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – питомий опір провідника,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;

$l$  – довжина провідника, м.

Теплова енергія, що виділяється в провіднику, може бути використана безпосередньо для нагрівання самого провідника, який у цьому разі є тілом, що нагрівається (принцип прямого нагрівання).

У разі непрямого нагрівання теплова енергія передається за допомогою спеціальних провідників (нагрівачів), по яких проходить електричний струм до інших виробів, які підлягають нагріванню шляхом конвекції та випромінювання теплової енергії. В обох випадках об'єктах, що нагрівається, може бути в твердому, рідкому або газоподібному станах.

Нагрівання провідників або виробів шляхом опору здійснюється в електричних печах опору (ЕПО), які застосовуються в машинобудуванні, металургії, легкої та хімічної промисловості, на транспорті, будівництві, комунальному та сільському господарстві тощо.

За призначенням ЕПО поділяються на такі:

- нагрівальні, які використовуються для обробки матеріалів (нагрівання, термічної, хіміко-термічної та вакуумної обробки, а також випалювання, сушіння, спікання різних металевих і керамічних матеріалів);

- плавильні, призначені для плавлення металів.

Переваги електропечей опору:

- можливість отримання в пічній камері температур до 3 000 °С;

- досить рівномірне нагрівання виробу шляхом відповідного розташування нагрівачів по стінках пічної камери або застосування примусової котельної циркуляції пічного повітря;
- легкість автоматичного керування потужністю, а отже, і температурним режимом печі;
- зручність механізації та автоматизації печей;
- компактність.

### 1.3 Класифікація нагрівальних печей та їхні особливості

#### 1. За принципом дії: непрямой та прямої дії.

В ЕПО непрямой дії електрична енергія перетворюється в теплову у спеціальних нагрівачах, а потім передається в робочий простір за допомогою теплопровідності, конвекції та випромінювання.

В ЕПС прямої дії тіло, що нагрівається, включається безпосередньо в електричний ланцюг.

2. За рівнем досягнення температур печі поділяються: на низькотемпературні (до 650 °С); середньотемпературні (до 1 250 °С); високо-температурні (вище 1 250 °С).

3. За режимом роботи: періодичної (камерні, шахтні, ковпакові, елеваторні) і безперервної дії (конвеєрні, рольгангові, карусельні, барабанні, протяжні).

Розглянемо особливості деяких печей опору.

*Електропечі опору з нагрівальними елементами періодичної дії.*

Печі з нагрівальними елементами (рис. 1.4) становлять футеровану камеру, у якій розміщені нагрівачі й оброблюваний виріб.

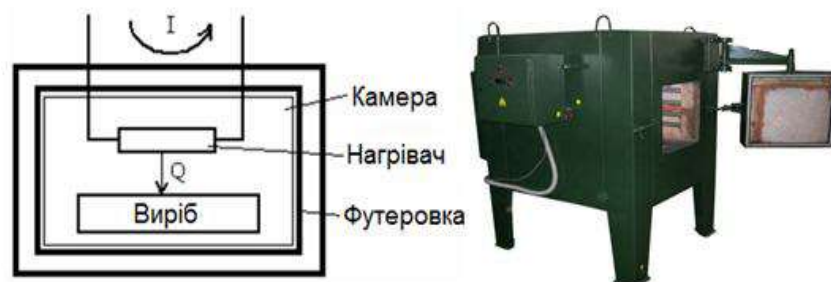


Рисунок 1.4 – Будова електропечі опору з нагрівальними елементами

По нагрівачу пропускається електричний струм. Температура нагрівача підвищується, і тепло від нього передається виробу, який нагрівається.

*Футеровка.* У низькотемпературних печах футеровка містить тільки теплоізоляційний шар (азбестовий), а жорсткість футеровки забезпечується двома, з'єднаними один із одним, внутрішнім і зовнішнім каркасами.

У середньотемпературних печах у футеровці з'являється вогнетривкий

шар, що виконаний із легковагих волокнистих вогнетривів.

У високотемпературних печах вогнетривкий шар виконаний з шамоту. Між вогнетривким шаром і шаром теплоізоляції вводиться додатковий шар легковаговика для зниження температури теплоізоляції до допустимої.

*Нагрівальні елементи* (НЕ). У низько- і середньотемпературних печах із температурою до 800 °С не виконуються з фехралю та константану, із температурою до 100 °С – із ніхрому. Ніхроми становлять сплав нікелю (75–78 %) і хрому (близько 25 %); фехралі – сплав заліза (73 %), хрому (13 %), алюмінію (4 %); хромонікелеві жароміцні сталі – сплав заліза (до 61 %), хрому (22–27 %), нікелю (17–20 %).

У високотемпературних печах використовуються неметалеві нагрівальні елементи: карборундові; вугільні; графітові або металеві. Карборундові елементи отримуються у процесі спікання кремнезему та вугілля. Металеві елементи виконуються з тугоплавких металів (молібдену, танталу, вольфраму тощо). Щоб уникнути розтріскування, неметалеві нагрівальні елементи повинні розігріватися поступово за умови малої потужності, що потребує застосування засобів регулювання напруги, яка підводиться.

За формою середньотемпературні не виконуються у вигляді зигзагів, дрітних і стрічкових, або спіралей, а високотемпературні – у вигляді стрижнів круглого або квадратного перерізу і труб.

Для низькотемпературного нагрівання широко застосовуються трубчасті електронагрівачі – тени, які становлять металеву трубку, заповнену теплопровідним електроізоляційним матеріалом з електронагрівальною спіраллю. Тени електробезпечні, можуть працювати в будь-якому середовищі, стійки до вібрації. Потужність тенів становить до 15 кВт, напруга – до 380 В, ресурс роботи – до 40 тис. год., робоча температура – до 730 °С.

Головні елементи та конструкція печей періодичної дії наведені на рисунку 1.5.

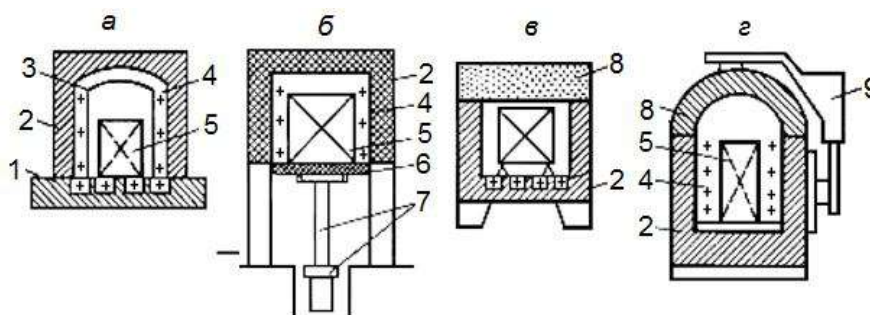


Рисунок 1.5 – Печі опору періодичної дії:

- а – ковпакова, б – елеваторна; в – камерна; г – шахтна;
- 1 – стенд; 2 – камера печі; 3 – жароміцний муфель;
- 4 – нагрівальні елементи; 5 – нагрівальний виріб (садіння);
- 6 – під, що опускає; 7 – підйомний пристрій; 8 – свод;
- 9 – механізм підйому своду

Вони відрізняються розташуванням і матеріалом НЕ, способами встановлення оброблюваних виробів у камеру печі, пристроєм футеровки тощо, а також механізмами передачі теплової енергії від НЕ до виробу. У низькотемпературних печах головним механізмом передачі тепла є конвекція (тепло передається потоком повітря, що циркулює). Для інтенсифікації процесу теплопередачі печі забезпечуються за допомогою вентиляторів.

У середньо- та високотемпературних печах основне тепло від нагрівача до виробу передається шляхом випромінювання у формі електромагнітних хвиль. У таких печах необхідна наявність оптичного зв'язку між НЕ і виробом.

**Ковпакова піч** – піч періодичної дії з відкритим знизу підйомним нагрівальним ковпаком і нерухомим стендом (рис. 1.5, а; рис. 1.6). Деталі, що нагрівають (садіння) (5), за допомогою підйомно-транспортних пристроїв поміщаються на стенд. Поверх них спочатку встановлюється жароміцний ковпак-муфель (3), а потім основний ковпак (2) камери печі, виконаної з металевого каркаса з вогнетривкою футеровкою. Нагрівальні елементи (4) розташовані по бічних стінках ковпака та в кладці стенду. Живлення НЕ здійснюється за допомогою гнучких кабелів і штепсельних роз'ємів. Після закінчення нагрівання електроживлення ковпака відключається та він переноситься на сусідній кіоск, де вже встановлено чергове завантаження для нагрівання. Охолодження виробу з необхідною швидкістю відбувається на стенді під жарополегливим муфелем.



Рисунок 1.6 – Види ковпакових печей

У ковпакових печах при кожному циклі втрачається лише теплота, що запасена в муфелі та кладці стенду, що становить 10–15 % від теплоти, яка запасена в кладці ковпака. Потужність колпакових печей досягає декількох сотень кіловат. У наслідок того, що ковпак і муфель можуть бути герметизовані, нагрівання та охолодження можна проводити у захисній атмосфері.

**Елеваторна електроніч** (рис. 1.5, б; рис. 1.7) – піч періодичної дії з відкритою знизу нерухомою камерою нагрівання (2) і з подом (6), що опускається. Піч становить циліндричну або прямокутну камеру, що встановлена на колонах на висоті 3–4 м над рівнем підлоги цеху.





Рисунок 1.7 – Конструкції елеваторних печей

Под печі піднімається та опускається за допомогою гідравлічного або електро-механічного підйомника, який установлений під камерою нагріву. Вироби (5), що нагрівають, навантажують на візок, потім за допомогою лебідки про-рухають під піч і піднімають підйомником (7), усуваючи в камеру.

Із закінченням технологічного процесу «под» опускається і виріб знімається. У низькотемпературних печах нагрівальні елементи (4) розташовані на стінках, у високотемпературних печах – на стінках і в «поду».

Елеваторні печі слугують для відпалу, емалювання, цементації, випалювання керамічних виробів, спікання та металізації деталей. Печі комплектуються за допомогою багатоступінчатих трансформаторів, розрахованих на ємності в десятки тонн, потужності до 600 кВт і температури до 1 500 К.

**Камерна електроніч** (рис. 1.5, в; рис. 1.8) – піч періодичної дії з камерою нагрівання, завантаження та розвантаження, садки якої відбувається в горизонтальному напрямку.

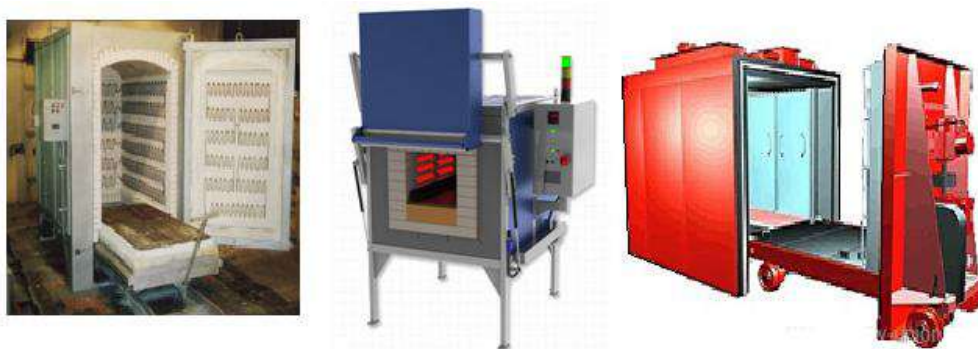


Рисунок 1.8 – Конструкції камерних печей

Камерна піч складається з прямокутної камери (2) з вогнетривкою футеровкою та теплоізоляцією, перекритою склепінням (8) і поміщеної в металевий кожух. Піч завантажується та вивантажується через отвір, що закривається дверцятами в передній частині.

У «поду» камерної печі зазвичай є жароупорна плита, на якій розташовані нагрівачі (4).

У печах до 1 000 К теплообмін забезпечується шляхом випромінювання або вимушеної конвекції, що забезпечується за допомогою замкнутої циркуляцією пічної атмосфери. Печі з номінальною температурою до 1 800 К працюють як з повітряною, так і з контрольованою атмосферою. У великих печах завантаження та розвантаження механізовані.

**Шахтну піч** (рис. 1.5, з; рис. 1.9) виконують у вигляді круглої, квадратної або прямокутної шахти, перекритої зверху кришкою. Нагрівальні елементи в ній встановлені зазвичай по бічних стінках.



Рисунок 1.9 – Конструкції печей шахтного типу

*Електропечі опору з нагрівальними елементами безперервної дії* (методичні печі). Конструкції печей безперервної дії розрізняються здебільшого механізмами переміщення нагрітих виробів у робочому просторі печі. За способом переміщення виробу всередині печі розрізняють конвеєрні, штовхальні, протяжні, тунельні й карусельні печі.

**Конвеєрна піч** (рис. 1.10) – із переміщенням садки на горизонтальному конвеєрі. «Под» печі становлять конвеєр – полотно, що натягнуте між двома валами, які приводяться в рух спеціальними двигунами. Вироби, що нагрівають укладаються на конвеєр і пересуваються на ньому через робочий простір печі. Конвеєрна стрічка може бути виконана плетеними з ніхромової сітки, штампованих пластин і з'єднувальних їх прутків, а також для важких нагрітих виробів – із штампованих або литих ланцюгових ланок.

Конвеєр розміщується в камері печі й не охолоджується. Однак вали конвеєра перебувають у дуже важких умовах і потребують водяного охолодження. Тому зазвичай кінці конвеєра виносять за межі печі. У цьому разі значно полегшуються умови роботи валів, але зростають втрати теплоти у зв'язку з охолодженням конвеєра у розвантажувальних і завантажувальних камерах.

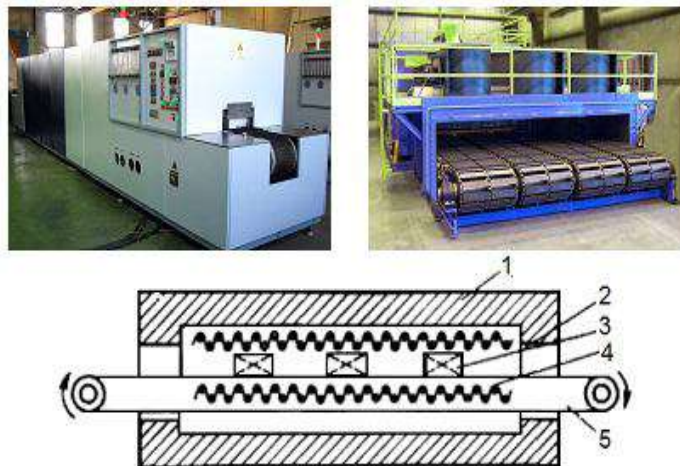


Рисунок 1.10 – Конвеєрна піч:

1 – теплоізолювальний корпус; 2 – завантажувальне вікно;  
3 – виріб, що нагрівається; 4 – нагрівальні елементи; 5 – конвеєр

Нагрівачі у конвеєрних печах зазвичай розміщуються на склепінні або в поду під верхньою частиною стрічки конвеєра, рідше на бічних стінках.

Конвеєрні нагрівальні печі переважно застосовуються для нагрівання порівняно дрібних деталей до температури близько 1 200 К.

**Штовхальні печі** (рис. 1.11) із переміщенням садки, шляхом прошовування вздовж робочого простору, призначені для нагрівання при високих температурах (вище 1 400 К).

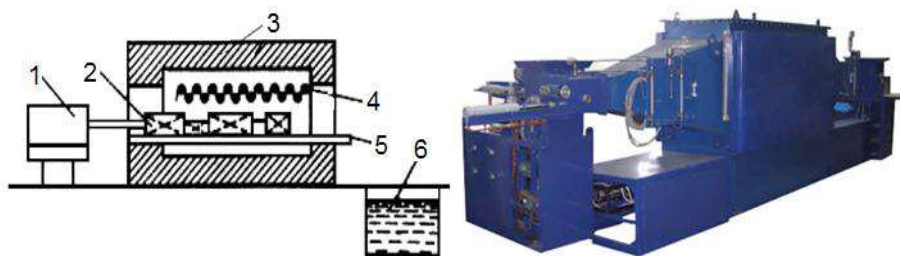


Рисунок 1.11 – Штовхальна піч:

1 – штовхач із приводним механізмом; 2 – вироби, що нагріваються;  
3 – теплоізолювальний корпус; 4 – нагрівальні елементи;  
5 – подина печі; 6 – ванна

Вони застосовуються для нагрівання як дрібних, так і великих деталей. На поду таких печей встановлюються напрямні у вигляді труб, рейок або роликів, виготовлених із жароупорного матеріалу, і по них у зварних або литих спеціальних піддонах переміщуються вироби, що нагріваються. Переміщення піддонів забезпечується електромеханічними або гідравлічними штовхальними пристроями. Головна перевага таких печей перед іншими типами – їхня



відносна простота, відсутність складних деталей із жаротривких матеріалів. Недоліки – наявність піддонів, застосування яких призводить до збільшення теплових втрат і до підвищеної втрати електричної енергії, обмежений термін служби піддонів.

Штовхальні водневі печі призначені для різних технологічних процесів, вимагають нагрівання у водні або дисоційованому аміаку. Вони широко застосовуються в електроламповому виробництві, під час виготовлення металокерамічних деталей і твердих сплавів, для випалу і спікання кераміки, для відпалу і пайки металевих деталей тощо.

**Протяжна електроніч** (рис. 1.12) – піч безперервної дії для нагрівання дроту, прутків або стрічки шляхом безперервного протягування через камеру нагрівання.



Рисунок 1.12 – Протяжна піч:

1 – теплоізолювальний корпус; 2 – нагрівальні елементи; 3 – муфель;  
4 – виріб, що нагрівається

Вона становить муфель із нагрівачами, через який пропускається виріб, що нагрівається. Печі з робочою температурою до 1 500 К обладнані металевими муфелями, а при більш високій температурі – керамічними. Печі з температурою 1 600 К обладнані багатоканальним алундовим муфелем, поверх якого намотаний молібденовий нагрівач. У протяжних печах застосовується змішаний спосіб нагрівання; прямий – за допомогою контактних приводних роликів і непрямий – за допомогою нагрівача.

Непряме нагрівання забезпечує термообробку решт прутка на початку і в кінці процесу, коли прямий нагрів не може бути здійснено.

#### 1.4 Установки прямого нагріву

Установки прямого нагрівання призначені для нагрівання заготовок під кування, відпалу труб, дроту, пружинного дроту під навивку. Установки не мають меж щодо досягнення температур, володіють високою швидкістю, пропорційним введенням потужності, мають високий ККД. Принципова схема прямого нагрівання зображена на рисунку 1.13.

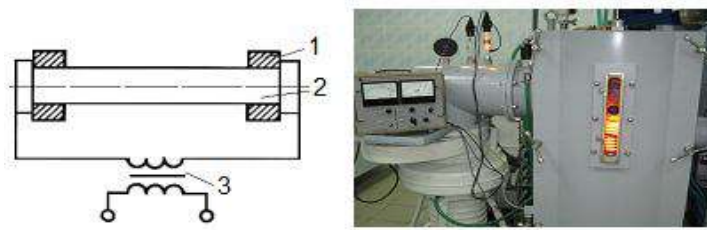


Рисунок 1.13 – Установка прямого нагрівання:  
1 – водоохолоджувальні затиски; 2 – виріб, що нагрівається;  
3 – пічний трансформатор

Існують печі прямого нагрівання періодичної дії для спікання прутків і штабиків із порошків рідких і тугоплавких металів при температурі до 3 000 К у захисній атмосфері. Установки прямого нагрівання складаються з таких головних вузлів:

- знижувальний трансформатор, що монтується в кожусі установки з обмоткою, яка охолоджується за допомогою води. Трансформатор має кілька ступенів напруги в діапазоні 5–25 для нагрівання тіл, що мають різний опір;
- струмопровід від виводів обмотки низької напруги трансформатора до водоохолоджуваних затискачів;
- затискачі, які забезпечують кріплення виробів, що нагріваються, та необхідний тиск у контактах підведення живлення;
- привід контактної системи;
- прилади контролю та автоматичного регулювання процесу нагрівання.

В установках безперервної дії для нагрівання дроту, труб, прутків застосовуються тверді роликові або рідинні контакти.

Печі прямого нагрівання (рис. 1.14) використовуються також для графітизації вугільних виробів, отримання карборунда тощо.



Рисунок 1.14 – Загальний вигляд печі опору з висувним подом для гартування деталей

Графітізовані печі виконують однофазними прямокутної форми з роз'ємними стінками. Під час їхньої роботи досягається температура 2 600–3 100 °С у вакуумі або нейтральній атмосфері.

Діапазон регулювання вторинної напруги становить 100–250 В, споживана потужність 5–15 тис. кВт. ККД установок прямого нагрівання залежить від опору навантаження в ланцюзі живлення і становить 70–80 %, коефіцієнт потужності – 0,8.

### ***Вакуумні печі опору та сушильні шафи***

Вакуумні печі опору (рис. 1.15) призначені для термообробки, паяння, спікання різних матеріалів і сплавів, сушіння.



Рисунок 1.15 – Конструкції вакуумних печей

У печах є можливість здійснювати технологічні процеси при температурах до 2 000–2 500 °С як у вакуумі до  $10^{-5}$  мм рт. ст., так і в середовищі нейтральних газів (аргон, азот підвищеної чистоти) при тисках до атмосферного. У наш час випускаються камерні й шахтні вакуумні печі опору. Параметри найважливіших технологічних процесів для вакуумних печей опору наведені в таблиці 1.1. Для сушіння матеріалів застосовуються сушильні шафи (рис. 1.16) із температурою 200–250 °С.

***Плавильні електронечі опору*** призначені для виплавлення олова, свинцю, цинку та різних сплавів на їхній основі, а також інших металів, що мають температуру плавлення 600–800 К.

Печі для плавлення алюмінію та його сплавів дають змогу досягти високої міри очищення металу. Печі мають просту конструкцію. За конструктивним виконанням розрізняють тигельні й камерні (або ванні) печі.

***Тигельні печі*** (рис. 1.17) становлять металевий посуд-тигель (із чавуну з внутрішньої обмазкою оксидами), поміщений у циліндричний корпус із вогнетривкого матеріалу (5) і покритий зовні металевим кожухом (6). Між тиглем і футеровкою розміщені електричні нагрівачі (4).

Пічь обладнана механічним дозатором. Дозування металу у проміжний ківш робота-маніпулятора або ливарну форму здійснюється за допомогою механічних, пневматичних або електромагнітних пристроїв.

Таблиця 1.1 – Технологічні процеси у вакуумних печах

Технологічні процеси	Параметри технологічних процесів вакуумних печей опору (без урахування середи)		
	Матеріал	Температура, °C	Тиск, Па
Термічна обробка	Титан і його сплави, високолеговані сталі, пермалой, сплави на основі нікелю	900–1 300	$10^{-1}$ – $10^{-2}$
	Молібден, ніобій, вольфрам та їхні сплави	1 800–2 200	$10^{-2}$ – $10^{-5}$
	Лейкосапфір і фіаніти	1 200–1 800	$10^{-1}$ – $10^{-2}$
Термообробка та спікання	Тугоплавкі матеріали	1 600–2 200	$10^{-1}$ – $10^{-2}$
Спікання	Високолеговані сталі та швидкорізальні	1 100–1 300	$10^{-1}$ – $10^{-2}$
	Титан, цирконій і сплави на їхній основі	900–1 200	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
	Уран і його сплави	1 000–1 300	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
	Магнітні матеріали систем ЮНДК	1 000–1 300	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
Спікання	Рідкісні й рідкоземельні метали та їхні сплави (скандій, ітрій, неодим, самарій)	1 000–1 300	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
	Оксидна кераміка	1 600–2 300	$10^{-1}$ – $10^{-2}$ $10^{-5}$ – $10^{-10}$ Ar
	Ніобій, тантал і їхні сплави	1 800–2 200	$10^{-2}$ – $10^{-5}$
	Молібден, вольфрам і їхні сплави	1 900–2 500	$10^{-1}$ – $10^{-2}$



Рисунок 1.16 – Конструкції промислових сушильних шаф

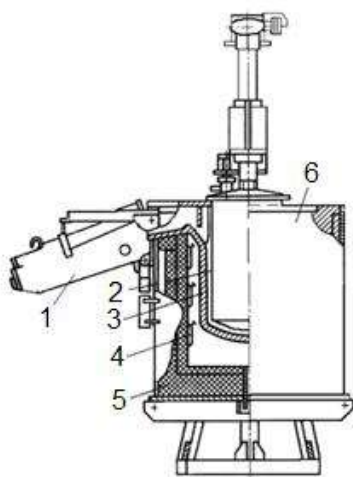


Рисунок 1.17 – Конструкції тигельних електричних печей опору:

1 – жолоб; 2 – механічний насос; 3 – тигель; 4 – нагрівач;  
5 – футерівка; 6 – корпус

Механічний насос (2) розміщений на каретці, що рухається вгору і вниз по напрямній колонці.

Після розплавлення металу та доведення його температури до необхідного рівня витискувач опускається в тигель і витісняє порцію металу, яка по обігрівальному жолобу надходить у ливарну машину. Тигельні ЕПО інших конструкцій мають механізм нахилу, що дає змогу нахилити піч і зливати розплавлений метал. Питома витрата електроенергії у процесі плавлення алюмінію становить 700–750 кВт·год/кг, а ККД печі – 50–55 %.

*Камерні печі* за обсягом більше тигельних і застосовуються для переплавлення алюмінію на злитки. Питома витрата електроенергії під час роботи ЕПО ванного типу становить 600–650 кВт·год/кг, а ККД – 60–65 %. У всіх типах ЕПО можливі два способи обігрівання – внутрішній і зовнішній. Під час внутрішнього обігрівання нагрівачі розміщені в розплавленому металі та працюють при температурі не вище 800–850 К. У разі зовнішнього розташування відкриті високотемпературні НЕ дають змогу отримати температури 1 100–1 200 К у робочому просторі печі.

### 1.5 Електрообладнання та регулювання параметрів печей опору

Потужність сучасних ЕПО коливається від часток кіловат до декількох мегават. Печі потужністю більше 20 кВт зазвичай виконують трифазними та підключають до мереж напругою 220, 380, 660 В безпосередньо або через пічні трансформатори. Коефіцієнт потужності печей опору близький до одиниці, розподіл навантаження за фазами трифазних печей рівномірний.



Електричне обладнання, що застосовується в ЕПО, розподіляється:

- на силові (трансформатори, що знижують і регулювальні автотрансформатори, блоки живлення, що приводять у дію механізми електроприводів, силова комутаційна і захисна апаратура);
- апаратуру керування (комплектні станції керування);
- контрольно-вимірювальні прилади (КВП),
- пірометричне обладнання.

Більшість печей виконують на напругу живильної мережі. Вони підключаються до мережі без спеціальних трансформаторів.

Регулювальні трансформатори й автотрансформатори застосовуються для живлення соляних ванн і установок прямого нагрівання, а також для печей опору з вольфрамовими, графітовими та молібденовими нагрівачами.

Застосування знижувальних пічних трансформаторів (рис. 1.18) дає змогу збільшити робочі струми та застосовувати для виготовлення нагрівачів провідники більшого перерізу, що підвищує їхню міцність і надійність.

Усі промислові печі опору працюють у режимі автоматичного регулювання температури, що дає змогу приводити у відповідність потужність печі з необхідним температурним режимом. Це, зі свого боку, призводить до зниження питомої витрати електроенергії порівняно з ручним регулюванням.

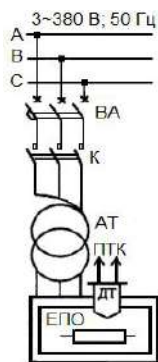


Рисунок 1.18 – Схема підключення ЕПО з пічним автотрансформатором:

ДТ – давач температури мережі; АД – двигун реверсивний для підйому й опускання дверей;

ЕМГ – електромагнітне гальмо

Регулювання робочої температури в печах опору відбувається шляхом зміни потужності, що надходить у піч такими способами:

- періодичним підключенням печі до електромережі й відключенням (двопозиційне регулювання);
- перемиканням нагрівачів печі з зірки на трикутник, або з послідовного з'єднання на паралельне (трипозиційне регулювання).

У процесі двопозиційного регулювання температура в робочому просторі ЕПО контролюється термопарами або фотоелементами. Функціональна схема печі та графік зміни температури та потужності при такому способі регулювання зображено на рисунку 1.19.

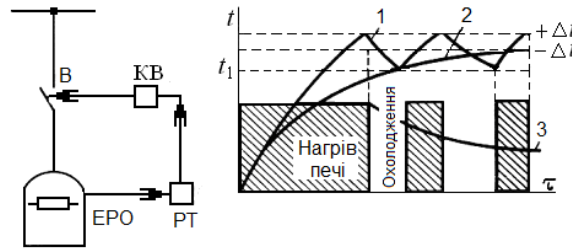


Рисунок 1.19 – Функціональна схема включення печі, вимірювання температури та потужності у процесі двопозиційного регулювання:

В – вимикач; РТ – регулятор температури;

КВ – котушка відключення вимикача;

1 – температура печі; 2 – температура тіла, що нагрівається;

3 – середня потужність, що споживана піччю

Включення печі здійснюється за допомогою регулятора температури РТ за допомогою подачі команди на котушку вимикача КВ. Температура в печі зростає до значення  $t_1 + T$ , у цей момент терморегулятор відключає піч. У наслідок поглинання теплоти тілом, що нагрівається, і втрат у навколишній простір температура знижується до  $t_1 - T$ , після чого РТ знову дає команду на підключення печі до мережі.

Глибина пульсацій температури залежить від чутливості регулятора температури, інерційності печі та чутливості датчика температури.

У разі трипозиційного регулювання потужність, що підводиться до печі, змінюється при перемиканні нагрівачів із зірки на трикутник. Регулювання температури цим методом дає змогу знизити потужність, що споживається з мережі. З енергетичною позиції метод регулювання досить ефективний, оскільки при ньому не виявляється шкідливого впливу на живильну мережу.

### Контрольні питання

1. Як класифікуються електротехнологічні установки?
2. Що належить до електротермічних установок нагрівання опором?
3. Як класифікуються за призначенням електричні печі опору?
4. Перелічити головні елементи електричних печей опору.
5. Що таке ковпакова піч?
6. Пояснити особливості роботи елеваторної та камерної печей.
7. Пояснити роботу конвеєрної, штовхальної та протяжної печей.
8. Що таке установки прямого нагріву та їхнє призначення?
9. Пояснити особливості роботи тигельних печей.
10. Яке електрообладнання використовується у процесі регулюванні параметрів печей опору?

## 2 НАГРІВАННЯ ОПОРОМ РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ

2.1 Електронагрівальні установки.

2.2 Електрошлакові установки.

2.3 Установки електроопалення та електрообігрівання

### 2.1 Електронагрівальні установки

Електричні котли застосовуються в різних галузях народного господарства для підігрівання води (електроводонагрівачі) та отримання насиченого технологічного пара низького тиску (електропарогенератори). Рідини: вода, розплави солей, оксидів – можуть бути нагріті шляхом прямого пропускання струму через їхній обсяг. Установки такого типу служать для кип'ятіння, варіння скла, термообробки металів.

Електроводонагрівач прямої дії становить циліндричний сталевий посуд, на верхній кришці якого розташовані стрижневі електроди й охоплюють їхні трубчасті антиелектрони. Між ними містяться склотекстолітові циліндри. Потужність, що розвивається котлом, регулюють шляхом зміни положення ізоляційних циліндрів відносно системи електродів і антиелектронів.

Номінальний режим роботи котла розрахований на нагрівання води з питомим електричним опором 3 000 Ом·см. Для отримання такого опору у воду додається розчин солі, або дистильованої води. Можлива робота котла і на воді з іншим питомим опором. Однак, щоб уникнути надмірного збільшення поверхневої щільності струму на електродах і утворення гримучого газу питомий опір має становити 1 000–5 000 Ом·см. Температура вихідної води автоматично підтримується в потрібних межах давачем.

**Електричний парогенератор** (рис. 2.1) становить комплект обладнання та апаратів, в який входить сам парогенератор, живильний бак, насос, сполучні трубопроводи, прилади контролю та керування. Парогенератор має електроди циліндричної форми та нульовий електрод. Потужність регулюється шляхом зміни рівня води між електродами та нульовим електродом. Робота парогенераторів здійснюється в автоматичному режимі.

**Електродні котли** (рис. 2.2) можуть мати трифазну й однофазну системи електродів, які працюють на низькій і високій напрузі. Котли низької напруги (30 В) потужністю 25–400 кВт з ККД 95–98 % мають малі габаритні розміри, низьку теплову інерційність. Високовольтні котли, розраховані на напругу 3–35 кВ, застосовують у побутових і виробничих цілях для систем централізованого опалення та гарячого водопостачання.

**Скловарні печі** (рис. 2.3) виконують у вигляді ванни, викладеної зсередини вогнетривким матеріалом. Ванна має три зони: варильне відділення, де відбувається розплавлення шихти й отримання рідкої скломаси, що перетікає з при-



донного каналу в друге – відділення, в якому уточнюється рецепт скла, що перетікає на видачу з заданою температурою. У всіх відділеннях у скломасі містяться електроди зі сталі, молібдену, графіту, що забезпечують протікання струму через скломасу і нагрівання її. Скловарні печі мають потужності від декількох сотень до декількох тисяч кіловатів і живляться від знижувальних трансформаторів з вторинною напругою 50–200 В. Печі працюють цілодобово, володіють великою тепловою інерцією та є спокійним електричним навантаженням.



Рисунок 2.1 – Електричний парогенератор



Рисунок 2.2 – Електроодні котли

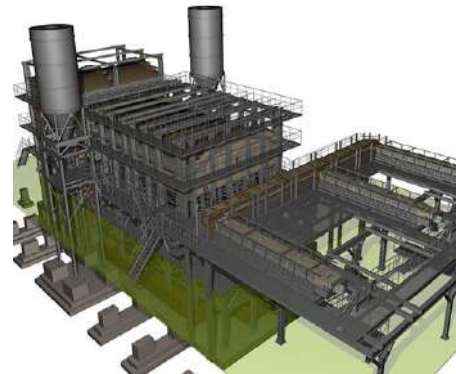


Рисунок 2.3 – Скловарна піч

**Рідинні установки** (рис. 2.4) для нагрівання металу. Для швидкого та рівномірного нагрівання металевих виробів і заготовок застосовуються електродні ванни, що становлять металевий або керамічний тигель, наповнений сіллю або скломасою, який опущені металеві або металокерамічні електроди. У холодному стані сіль майже не електропровідна, але якщо її нагріти та розплавити, то між електродами починає протікати електричний струм і в розплаві, як в активному опорі, виділяється тепла енергія.

Теплофізичні властивості розплавлених солей, оксидів визначають інтенсивний теплообмін між середовищем і зануреними в неї металевими предметами, а також високу однорідність температурного поля ванни. Перебуваючи в розплаві, вироби захищені від окислення. Цей захист зберігається і після виймання виробів із розплаву, оскільки тонка плівка його залишається на виробах і міцно закриває їхню поверхню.

ЕПС з рідким нагрівачем застосовують для нагрівання до 1 100–1 600 °С виробів із легованих сталей перед загартуванням, куванням або штампуванням, а також для відпалу деталей із сталі й чавуну. Електродні ванни підключаються до мережі змінного струму через знижувальні трансформатори із вторинною напругою на електродах 10–35 В. Схема електродної ванни наведена на рисунку 2.4.

Для зниження температури плавлення та забезпечення рівня електропровідності як робоче середовище застосовують солі (хлористі, фтористі або азотно-кислі). Для запуску ванни або розплавлення застиглого електроліту застосовують пускові нагрівачі, що становлять собою блок відкритих нагрівальних елементів, установлених на каркасі та споруджуваних у ванні.

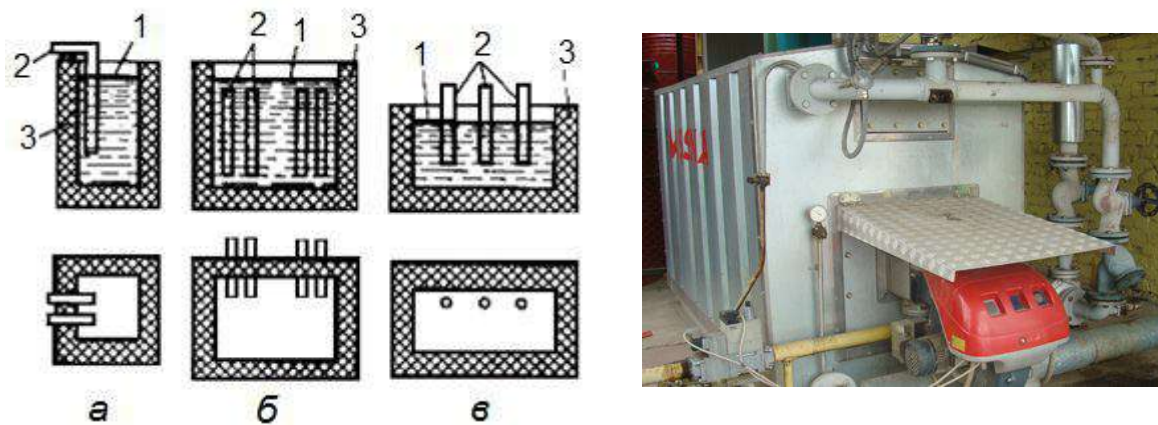


Рисунок 2.4 – Схеми однофазних електродних ванн з близько розташованими електродами:

*а, б* – однофазні; *в* – трифазні; 1 – рівень розплаву солі;  
2 – електроди; 3 – футеровка

Серед достоїнств соляних ванн варто виокремити:

- високу швидкість нагрівання та більшу продуктивність порівняно з іншими нагрівальними установками при однакових габаритних розмірах;
- легкість здійснення різних способів термічної та термохімічної обробки;
- захист виробів від окислення в процесі нагрівання.

Недоліки:

- підвищена питома витрата електроенергії внаслідок збільшених теплових втрат із дзеркала ванни та необхідності безперервної роботи установки;
- висока витрата розплавоутворювального матеріалу;
- важкі умови праці обслуговуючого персоналу.

## 2.2 Електрошлакові установки

Розігрівання розплаву сполук шлаку до температури 2 000–2 300 за допомогою струму, що проходить по ньому, є основою процесів електрошлакового переплавлення і електрошлакового зварювання. Ці процеси розроблені в інституті електрозварювання ім. Е. О. Патона АН УРСР і значною мірою зусиллями цього інституту поширені в багатьох країнах.

Сутність ЕШП полягає в такому (рис. 2.5).

Споживаний електрод 1 із металу, що переплавляється, занурюється в шар електропровідного шлаку (2), який перебуває у водоохолоджувальному кристалізаторі (3), закритому водоохолоджувальним піддоном (4). Електричний струм протікає між електродом і піддоном через шлак, який має високий електричний опір й інтенсивно розігрівається.

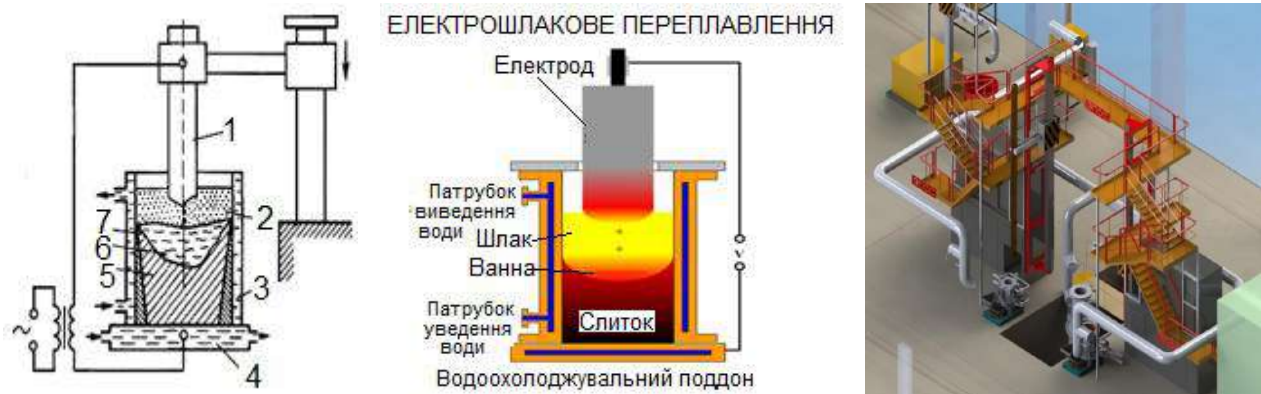


Рисунок 2.5 – Схема установки електрошлакового переплавлення та її загальний вигляд:

1 – електрод; 2 – шлак; 3 – кристалізатор; 4 – піддон;  
5 – розплавлений метал; 6 – злитки металу; 7 – гарнісаж

Торець електрода, що міститься в розплаві шлаку, розплавляється, і краплі металу, що стікають з електрода, проходять скрізь шлак, де додатково розігріваються, очищаються від небажаних домішок і збираються на дні кристалізатора у вигляді злитка. У наслідок відведення теплоти в піддон і стінки кристалізатора, де утворюється метал, застигають у вигляді злитка (6), у верхній частині якого знаходиться ванна розплавленого металу (5). У процесі оплавлення електрод подається вниз. Між стінкою кристалізатора і злитком утворюється шар гарнісажу (7) (твердий захисний шар, що утворюється при плавлі на внутрішній (робочій) поверхні стінок).

Головне призначення установок ЕШП – виробництво злитків із високоякісних сталей: валкових, шарикопідшипникових, неіржавних, жароміцних. Фактори, що поліпшують якість металу у процесі обробки: хімічна взаємодія зі шлаком; спрямована кристалізація злитка; формування злитка в шлаковому гарнісажі з утворенням гладкої поверхні. Електричний режим печей характеризується наявністю періодичних пульсацій струму, обумовлених утворенням крапель і змінним значенням міжелектродного проміжку.

Від параметрів і конструкції печі залежать маса та форма виплавленого злитка. Розрізняють одно-, дво-, три- і багателектродні печі. Одно- і двоелектродні печі виконують за однофазною схемою, а три- і багатоелектродні – за одно- й трифазною схемами.

Найрозповсюдженими є одноелектродні однофазні печі (рис. 2.6, *а*). Трифазні печі (рис. 2.6, *б*) відрізняються від однофазних кращими енергетичними показниками, але характеризуються меншим коефіцієнтом заповнення кристалізатора, що призводить до збільшення довжини електрода та висоти печі.

Однофазна біфілярна піч (рис. 2.6, *в*) призначена для отримання злитків прямокутного перерізу. Порівняно зі звичайними однофазними печами вона має більш високий коефіцієнт потужності (до 0,9) та меншу питому витрату електроенергії.

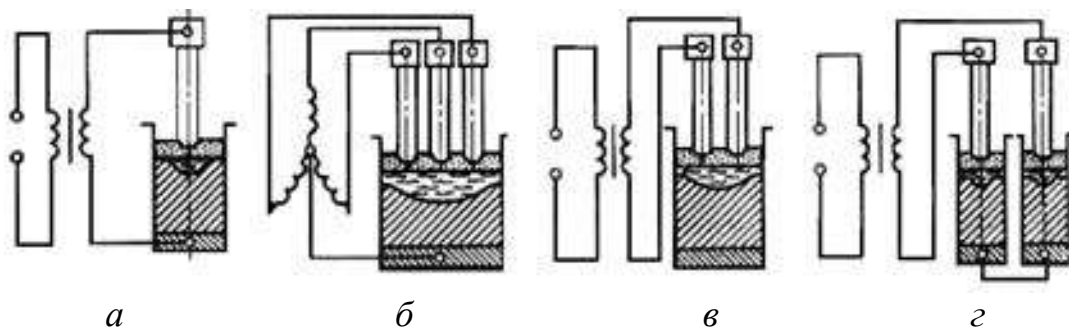


Рисунок 2.6 – Електричні схеми печей ЕШП:

*а* – однофазна; *б* – трифазна; *в* – двохелектродна однофазна;  
*г* – двохелектродна однофазна для отримання двох злитків

Одночасне сплавлення двох злитків можливо за схемою з послідовним підключенням двох печей до одного трансформатора (рис. 2.6, *г*). Така схема забезпечує високі техніко-економічні показники внаслідок біфілярності електродів і короткої мережі, а також скорочення протяжності струмопроводів і зменшення необхідної виробничої площі. Деякі параметри ЕШП наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри електрошлакових пристроїв

Параметр	ЕШП-2,5 ВГ	ЕШП-10 Г	ЕШП-20 ВГ
Потужність джерела живлення, кВ·А	1 600	2 500	5 000
Максимальний струм, А	21 000	28 000	50 000

**Електрошлакове зварювання** (далі ЕШЗ) широко використовується в промисловості для з'єднання металів великої товщини: сталі, чавуну, міді, алюмінію, титану та їх сплавів. Як тепловидільних елемент тут використовуються розплавлені шлаки, які нагріваються до заданої температури у процесі протіканні по ним змінного струму. Принципова схема ЕШЗ показана на рисунку 2.7.



Електрод (3) та частини зварюваного металу включаються в електричний ланцюг через шлак (2), що нагрівається минаючим струмом вище температури плавлення електродного металу (1) і що зварюється. У наслідок цього електродний і зварюваний метали розплавляються та стікають на дно зварювальної ванни (5), заповнюючи шов (4). Бокові сторони шва закриваються охолоджуваними повзунами.

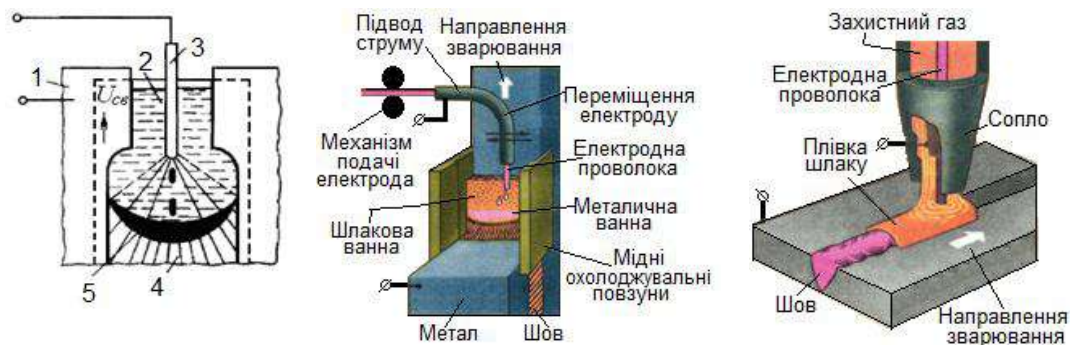


Рисунок 2.7 – Схеми електрошлакового зварювання:

1 – метал; 2 – шлак; 3 – електрод; 4 – шов; 5 – зварювальна ванна

ЕШЗ здійснюється за допомогою автоматів та напівавтоматів, що подають електродний дріт і дозувальний флюс, для чого потрібна відповідна апаратура керування. Джерела живлення ЕШС мають різні зовнішні характеристики: від крутопадаючих до жорсткої, потужність 60–550 кВ·А, вторинну напругу 8–63 В.

### 2.3 Установки для електроопалення та електрообігрівання

Електричні нагрівальні установки застосовують: для сушіння виробів після фарбування, просочування; сушіння приміщень під час будівельних робіт; підігрівання газів для різних технологічних цілей; опалення приміщень; розігрівання ємностей із рідиною, пластичними та в'язкими матеріалами, а також для нагрівання твердих тіл і пристроїв: пресів, штампів; прогрівання технологічних трубопроводів; прогрівання бетону, ґрунтів і дорожніх покриттів.

В електроопаленні й електрообігріві використовується велика різноманітність різних пристроїв. До них належать електрокалорифери, фени, різні пристрої радіаційного обігрівання, електрокотли, електричні теплоакумуючі пристрої, пристрої для відтавання ґрунту, обігріву бетону, дорожніх покриттів тощо.

**Електрокалорифер** (рис. 2.8) – електронагрівальний апарат, що складається з нагрівального елемента та вентилятора. Він призначений для нагрівання повітря та різних газів у технологічних процесах. Такі електрокалорифери з ви-

мушеною конвекцією забезпечують інтенсивний теплообмін і мають у кілька разів меншу поверхню нагрівання порівняно з поверхнями електронагрівальних пристроїв з вільно конвективним способом теплообміну.

**Світлий кварцовий випромінювач** (рис. 2.9) становить трубку з кварцового скла, усередині якої розміщуються вольфрамові ніхромові або хромоалюмінієві спіралі. Щільність променистого потоку становить до  $60 \text{ кВт/м}^2$ .



Рисунок 2.8 –  
Електрокалорифер



Рисунок 2.9 – Світлий  
кварцевий випроміню-  
вач



Рисунок 2.10 – Темний  
випромінювач

**Темний випромінювач** (рис. 2.10) становить трубчастий електронагрівач, що розташований у фокусі полірованого відбивача. Робоча температура поверхні випромінювача становить  $700\text{--}1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимум випромінювання припадає на довжини хвиль  $2\text{--}5 \text{ мкм}$ .

**Електричні сушарки** (рис. 2.11). Установки для сушіння виробів можуть бути радіаційної або змішаної дії, коли передача теплоти випромінюванням поєднується з конвекцією (установки конвективно-радіаційного типу).



Рисунок 2.11 – Електросушильні установки

Під час конструювання сушарок потрібно забезпечити достатню інтенсивність повітрообміну, особливо в тих випадках, коли в наслідок сушіння випаровуються вибухонебезпечні речовини.

**Електричні опалювальні пристрої** виправдані в тих випадках, коли для використання іншого виду енергії потрібні значні капітальні витрати (будівництво нової котельні), виникають значні додаткові труднощі в забезпеченні

паливом, коли необхідно враховувати екологічний фактор – чистоту навколишнього середовища.

Можна виокремити способи електроопалення: опалення з використанням електрокалориферів з підігріванням повітря; опалення за допомогою панельних нагрівачів; опалення з використанням низькотемпературного променистого обігрівання.

Для опалення будівель або окремих приміщень із підвищеними гігієнічними вимогами (лікарень, операційних тощо) за необхідності застосовують повітряне опалення з використанням електрокалориферів або електричні обігрівачі (рис. 2.9) із природною конвекцією (панельні нагрівачі), які вигідно відрізняються від калориферів відсутністю вентилятора. Крім того, при обігріві приміщень обігрівачі легко можуть бути розміщені в різних їх частинах, що дає змогу забезпечити без спеціального розведення повітря більш рівномірний розподіл теплоти.



Рисунок 2.12 – Електричні опалювальні пристрої

Під час здійснення електроопалення з використанням низькотемпературного обігріву як нагрівальні поверхні використовуються підлога, стеля і стіни приміщення, в які монтуються нагрівальні елементи. Такий спосіб опалення дає змогу отримати необхідний розподіл температури в приміщенні, зменшити масу нагрівальної установки, досягти достатніх гігієнічних умов.

### Контрольні питання

1. Перелічити головні електронагрівальні установки.
2. Що таке електричний генератор та електродні котли?
3. Для чого призначені рідинні установки? Особливості їхньої роботи.
4. У чому полягає сутність роботи електрошлакових установок?
5. Для чого використовується електрошлакове зварювання?
6. Перелічити установки електроопалення та електрообігрівання?
7. Чим відрізняється світлий кварцовий випромінювач від темного?

## 3 ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ

3.1 Загальні принципи індукційного нагрівання.

3.2 Індукційні плавильні печі.

3.3 Індукційні нагрівальні установки.

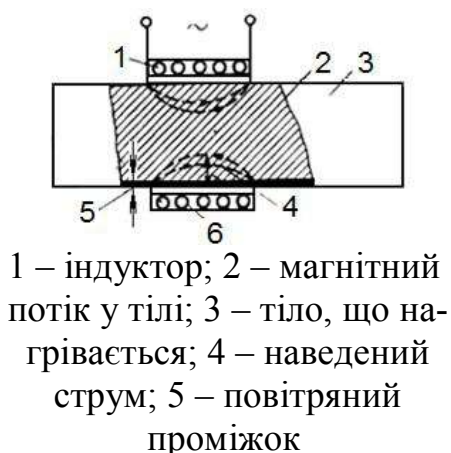
3.4 Установки діелектричного нагрівання.

### 3.1 Загальні принципи індукційного нагріву

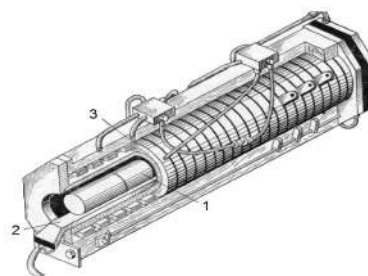
Індукційне нагрівання (далі ІН) застосовується для такого:

- плавлення металів і неметалів;
- поверхневого гарту;
- нагрівання виробів для пластичної деформації;
- зварювання та паяння;
- зонного очищення металів і напівпровідників;
- отримання монокристалів із тугоплавких оксидів;
- отримання плазми.

У процесі індукційного нагрівання в тілах, що нагріваються під дією електромагнітної енергії, виникають вихрові струми, які нагрівають тіло за законом Джоуля – Ленца. Індукційне нагрівання застосовується в установках прямої та непрямої дії. Принципова схема ІН зображена на рисунку 3.1.



1 – індуктор; 2 – магнітний потік у тілі; 3 – тіло, що нагрівається; 4 – наведений струм; 5 – повітряний проміжок



1 – заготовка; 2 – направляюча;  
3 – індуктор

Рисунок 3.1 – Принципіальна схема індукційного нагріву та індукційний нагрівач

Індуктор створює змінний магнітний потік і працює як первинна обмотка силового трансформатора. Тіло поміщається всередині індуктора у такий спосіб, щоб між індуктором і тілом залишався зазор. У такому положенні воно нагрівається та виконує роль вторинної обмотки трансформатора з одним к.з. витком.



ЕРС, яка виникає в тілі, що нагрівається, пропорційна магнітному потоку та забезпечує виникнення струму в тілі:

$$E = 4,44\Phi \cdot \omega \cdot f, \quad (3.1)$$

де  $E$  – ЕРС, що виникає в тілі;

$\Phi$  – магнітний потік, що виробляється індуктором, Вб;

$\omega$  – кількість витків індуктора;

$f$  – частота напруги живлення мережі, Гц.

Потужність, що виділяється в нагрітому тілі, пропорційна до квадрату струму й опору тіла, що нагрівається:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (3.2)$$

де  $I$  – вихровий струм, що виникає в тілі, А;

$R$  – активний опір тіла, що нагрівається, Ом.

Перевагами електроустановок індукційного нагріву є такі:

- висока швидкість нагрівання, яка пропорційна до введеної потужності;
- найкращі санітарно-гігієнічні умови праці;
- можливість регулювання зони дії вихрових струмів у просторі (ширина і глибина прогрівання);
- простота автоматизації технологічного процесу;
- необмежений рівень температур, що досягаються, достатніх для нагрівання металів, плавлення металів і неметалів, перегрівання, розплавлення, випаровування матеріалів і отримання плазми.

Недоліки:

- використання складних джерел живлення;
- підвищена питома витрата ЕЕ на технологічні операції.

Серед особливостей індукційного нагрівання можна виокремити можливість регулювання просторового розташування зони протікання вихрових струмів.

Ефективність передачі енергії від індуктора до тіла, що нагрівається залежить від величини повітряного зазору між ними та підвищується у разі його зменшення. Глибина нагрівання тіла збільшується зі зростанням його питомого опору і знижується зі збільшенням частоти струму. Струм індукторів становить від сотень до декількох тисяч ампер при середній щільності струму  $20 \text{ А/мм}^2$ . Втрати потужності в індукторі можуть досягати 20–30 % від корисної потужності.

Індукційні електротехнологічні установки поділяються на плавильні, нагрівальні й гартівні. Печі можуть працювати на промисловій частоті 50 Гц, середньої частоті 0,5–10 кГц і високої частоті: сотні-тисячі кГц.

### 3.2 Індукційні плавильні печі

Індукційні плавильні печі (далі ІКП) застосовуються для плавлення чорних і кольорових металів: алюмінію, чавуну, міді, сталі, а також для виробництва фасонного лиття з чорних і кольорових металів. На сьогодні в чавунно-ливарному виробництві застосовуються: 76 % вагранок, 23 % індукційних плавильних печей і 1 % електродугових печей. Спостерігається стійка тенденція до збільшення обсягів використання індукційних плавильних печей.

За конструкцією плавильні печі поділяються на індукційні каналні печі (далі ІКП) та індукційні тигельні печі (далі ІТП). Канальні печі мають осердя, тигельні виконуються з осердям або без нього.

Робочому процесу печей властивий: електродинамічний і тепловий рух рідкого металу у ванні або тиглі, що сприяє отриманню однорідного за складом металу та рівномірному прогріванню його по всьому об'єму;

Робочі температури печей:

- 750 °С – для виплавлення алюмінію;
- 1 200 °С – для виплавлення міді;
- 200–1 400 °С – для виплавлення чавуну;
- 1 600 °С – для виплавлення сталі.

Індукційні каналні печі застосовуються для плавлення кольорових металів, високоякісних сплавів і чавуну. Печі працюють тільки на промисловій частоті.

Переваги ІКП:

1. Високий ККД печей.
2. Висока надійність печі під час використання новітніх футеровок, високе напруження на відмову ванни печі – не менше трьох років.
3. У печі відбувається інтенсивне перемішування металу без розриву оксидної плівки, що забезпечує: однаковий хімічний склад та однакову температуру по всьому об'єму печі; є можливість підшихтовки легуючими елементами.
4. Висока точність підтримки температури розплаву в наслідок використання вбудованого блоку контролю температури розплаву, що забезпечує зменшення ливарного браку, чаду через відсутності перегрівання металу, збільшення терміну служби футеровки.
5. Низькі енерговитрати на розплавлення металу.
6. Низька витрата охолоджувальної води.
7. Зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу.

8. Не потрібен фундамент печі та кріплення його до підлоги у процесі монтажу; не потрібна висока кваліфікація обслуговчого персоналу.

Класифікація печей:

- за кількістю фаз: одно-, дво- і трифазні;
- за конструктивним виконанням каналу: із відкритим або закритим каналом. На практиці зазвичай використовуються печі з закритим каналом;
- за кількістю каналів на фазу: одно-, дво- і триканальні;
- за розташуванням каналів: із вертикальним; горизонтальним; похилим;
- за формою каналу: із круглим; прямокутним; трикутним.

Серед головних вузлів ІКП виокремлюють плавильну футеровану ванну й індукційну одиницю, в яку входять подовий камінь із закритим каналом, магнітне осердя та індуктор (рис. 3.2).

Ванна печі являє собою кожух із заліза, усередині якого міститься футеро- вка. На бічній поверхні кожуха розташований зливний отвір.

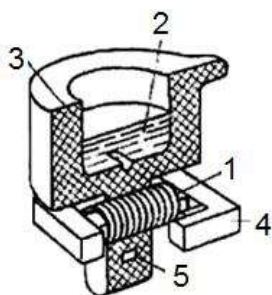


Рисунок 3.2. – Індукційна канална плавильна піч:

- 1 – індуктор; 2 – розплавлений метал; 3 – ванна (шахта або тигель);  
4 – магнітне осердя; 5 – подовий камінь з каналом тепловідведення

Індукційна піч (див. рис. 3.2) складається з індуктора, шихтованого магнітопроводу і подового каменю, що охоплюють індуктор плавильними каналами.

*Індуктор* фактично є первинною обмоткою трансформатора, виконується з міді круглого, прямокутного перерізу або з мідної трубки, усередині якої циркулює вода (водяне охолодження).

*Магнітопровід* становить осердя, що зібрано з листової трансформаторної сталі осердя броньового або стрижневого типу.

*Подовий камінь* виконується з бронзи або немагнітної сталі, має один або кілька каналів тепловідведення. Канал із розплавленим металом (1) є короткозамкненим витком вторинної обмотки трансформатора. Для з'єднання ванни з подовими каменем у піддоні є отвір. У момент плавлення відбувається циркуляція розплавленого металу з каналу у ванну й навпаки.

Заміщення більш нагрітого металу більш холодним відбувається весь час, поки існує різниця температур у каналі й шахті печі. Через недостатню циркуляцію металу його температура в каналі може на 100–200 °С перевершувати температуру у ванні. Ця обставина здебільшого визначає питому потужність ІКП, їхню продуктивність, а також термін служби футеровки каналу.

Канал тепловиділення повинен бути постійно заповнений електропровідним тілом. Для первинного пуску каналних печей у їхній канал заливають розплавлений метал або вставляють шаблон із матеріалу, який буде плавитися в печі. Під час завершення плавки метал з печі зливають не повністю, залишаючи так зване «болото», яке забезпечує заповнення каналу тепловиділення для подальшого пуску. Індукційні печі бувають одинарні та здвоєні, з одним або двома каналами на один індуктор (рис. 3.3).

Футеровку каналу виконують з набивних мас різного складу залежно від виплавленого металу або сплаву.

Для зливу металу (рис. 3.4) через зливний носок (4) піч нахилиється за допомогою гідро- або електроприводу. Завантаження печі ведуть зверху через отвір, закритий під час плавки футерованою кришкою (5). Підйом кришки здійснюється гідро- або електроприводу. Подовий камінь (10) охолоджується повітрям, який через зазор вводиться по гнучким кабелям за допомогою вентилятора (9).

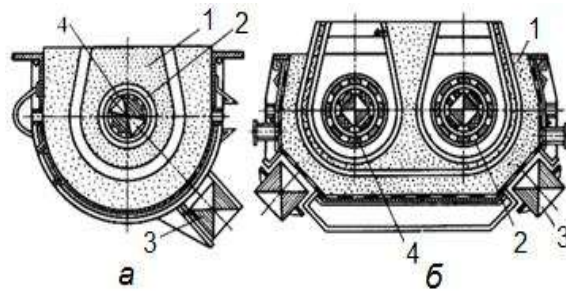


Рисунок 3.3 – Конструкція індукційних одинарних каналних печей:

*a* – одинарна; *б* – здвоєна;

1 – футеровка; 2 – водоохолоджуваний кожух;

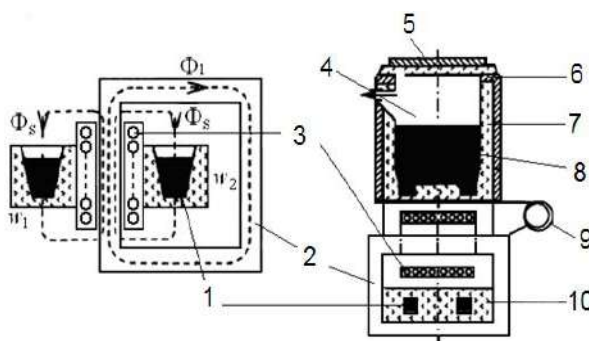


Рисунок 3.4 – Схема і конструкція ІКП:

1 – канал із розплавленим металом; 2 – шихтований магнітопровід;  
3 – обмотка магнітопровода; 4 – зливний носок; 5 – кришка; 6 – прокладка;  
7 – футерована ванна; 8 – метал; 9 – вентилятор; 10 – подовий камінь

**Принцип роботи печі.** Індукційна піч становить своєрідний трансформатор, первинною обмоткою якого є індуктор, а вторинна обмотка та навантаження – замкнений канал із розплавленим металом. Працює такий трансформатор у режимі КЗ, при якому вся енергія, що підводиться, витрачається на нагрівання металу.

У разі включення індуктора в мережу змінний струм (що виникає в індукторі) створює навколо нього змінне магнітне поле, яке замикається через сталь осердя. Зі свого боку, змінний магнітний потік індукує в металі каналу ЕРС, унаслідок чого в металі каналу з'являється струм. Наведений у замкнутому ланцюгу каналу струм буде виділяти в каналі тепло.

Головні різновиди каналних печей зображені на рисунку 3.5.

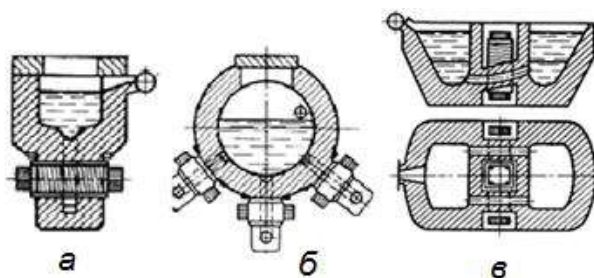


Рисунок 3.5 – Основні типи конструкцій індукційних каналних печей:  
а – шахтна; б – барабанна; в – двокамерна

В індукційній каналній печі *шахтного типу* плавильна камера має форму вертикального циліндра, до донної частини якого приєднана плавильна одиниця (рис. 3.5, а).

Під час розливання металу піч нахиляється за допомогою гідравлічного пристрою.

В ІКП *барабанного типу* плавильна камера виконана у вигляді горизонтально розташованого циліндра. Вона встановлена на цапфах або ковзанках з різними приводами механізму нахилу. Піч має декілька індукційних одиниць, які встановлені в її нижній частині (рис. 3.5, б).

Двокамерні каналні печі виконані з похилими або горизонтально розташованими каналами, що з'єднують між собою дві ванни. До того ж одна з них використовується як плавильна, а інша як роздавальна (рис. 3.5, в).

Технічні характеристики індукційних печей. У процесі плавлення вторинних ресурсів (дані щодо латунних сплавів) безповоротні втрати становлять 6–8 %, продуктивність на місяць – 70–90 т.

Коефіцієнт потужності індукційних печей  $\cos\varphi = 0,2\text{--}0,8$ . Менші значення коефіцієнта потужності відповідають ІКП для плавлення металів із низьким питомим опором (мідь, алюміній), а великі значення – із високим (сталь, чавун).

Живлення печей здійснюється від мереж напругу 380 В і вище залежно від потужності. Печі з осердям випускаються одно-, дво- і трифазними потужністю до 2 000 кВт. На рисунку 3.6 наведена схема живлення ІПК промислової частоти від пічного трансформатора напругою 10/0,4 кВ. Паралельно індуктору підключена батарея конденсаторів, що складається з постійно включеним секції 3 і N керованих секцій  $C_1$ – $C_N$ .

В основі роботи печей без осердя також лежить трансформаторний принцип передачі енергії індукцією від первинної до вторинної обмотки ланцюга. Електрична енергія змінного струму, що підводиться до печі, перетворюється в електромагнітну, яка у вторинній обмотки ланцюга перетворюється в електричну, а потім у теплову.

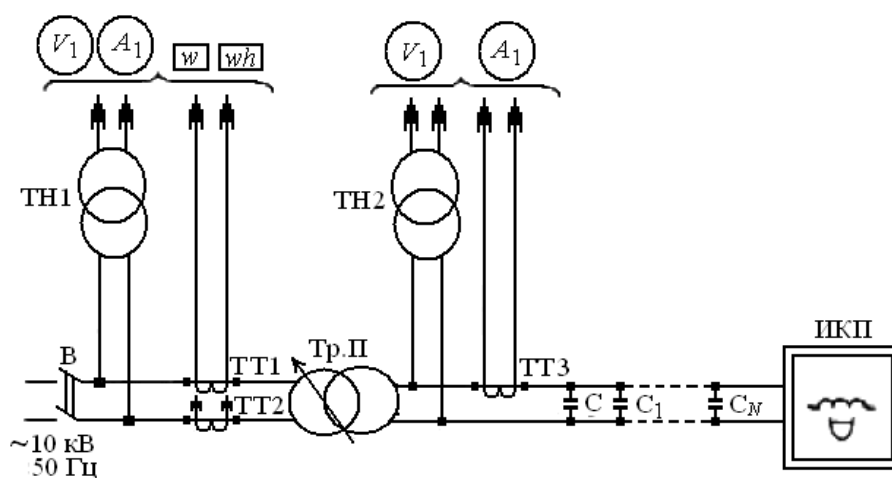


Рисунок 3.6 – Принципова електрична схема живлення індукційної каналної печі промислової частоти

Первинною обмоткою слугує індуктор, вторинною обмоткою та навантаженням – розплавлений метал, який завантажений у тигель і поміщений усередині індуктора. Магнітний потік проходить по самій шихті, тому велике значення мають магнітні властивості, а також розміри та форма завантаженої шихти.

Магнітна проникність для феромагнітних матеріалів досить висока і до температури 740–770 °С вона постійна за величиною. У цьому разі шихта одночасно грає роль незамкнутого осердя. Після того як температура матеріалу, що розплавляється, перевищує допустимі значення, робота печі стає аналогічною роботі трансформатора без осердя. Величина ЕРС у кожному витку пропорційна до частоти й величини магнітного потоку. За відсутності осердя провідність для магнітних силових ліній знижується, тому збільшують частоту змінного струму.

На рисунку 3.7 зображена ІТП без осердя, яка складається з індуктора 1, що підключається до джерела живлення змінного струму. У розплавлених пе-



чах великої ємності передбачається зовнішній магнітопровід (рис. 3.8). У тигель можна завантажувати будь-яку шихту: відходи ливарного виробництва, чушки, дрібну стружку тощо.

Індуктори виготовляють із мідної трубки (круглого або квадратного перетину), охолоджуваній водою, що накладається в один шар. Обмотка складається з декількох котушок, що мають роздільне водяне охолодження. Печі можуть працювати з залишенням сплаву (25–30 % ємності тигля) або без нього.

В ІТП великої ємності застосовуються джерела живлення промислової частоти, середньої та малої місткості – підвищеної та високої частоти.

*Не електропровідні тиглі* виготовляють з кварцитовий, магнезитових, цирконієвих матеріалів. Вони розміщуються всередині індуктора, не поглинають енергію магнітного поля і одночасно є теплоізоляторами між розплавленим металом і охолоджуваними стінками індуктора. Конструкції тигельних печей показано на рисунках 3.8–3.10.

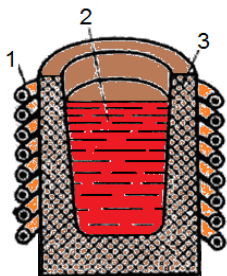


Рисунок 3.7 – Індукційна тигельна піч:

1 – індуктор; 2 – розплавлений метал;  
3 – тигель

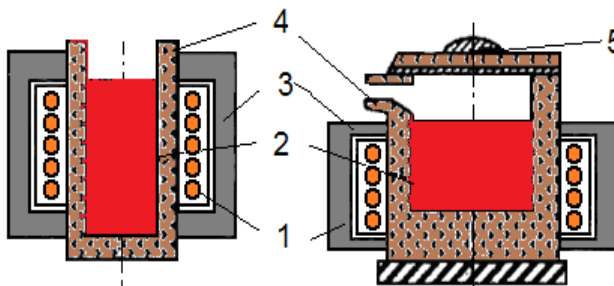


Рисунок 3.8 – Схема і конструкція індукційної тигельної печі:

1 – індуктор; 2 – розплавлений метал;  
3 – магнітопровід; 4 – вогнетривкий тигель;  
5 – кришка підйому

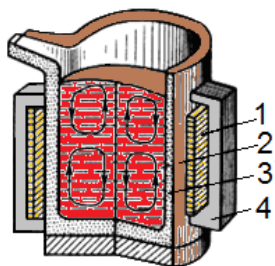


Рисунок 3.9 – Напрямок струмів у розплавленому металі:  
1 – індуктор; 2 – сталевий тигель; 3 – футеровка; 4 – магнітопровід

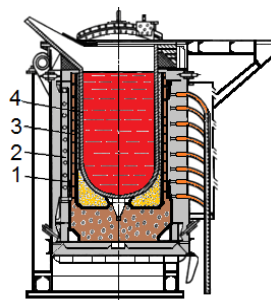


Рисунок 3.10 – Індукційна тигельна піч для плавлення магнію:  
1 – індуктор; 2 – магнітопровід;  
3 – набивна футеровка; 4 – сталевий тигель

*Електропровідні тиглі* виготовляють із жаротривких сталей, легованих чавунів і графітів. Вони поглинають найбільшу частину енергії змінного електромагнітного поля. Нагрівання до розплавлення металів відбувається випромінюванням: (для шихти роздробленою з малим коефіцієнтом заповнення), а після – контактним шляхом. Зовнішні стінки таких тиглів повинні бути ізольовані від внутрішніх стінок індуктора.

Технічні характеристики печі.

Загальний ККД тигельної печі 0,48–0,68. Коефіцієнт потужності ІТП  $\cos \varphi = 0,05 - 0,3$ .

Для компенсації реактивної потужності потрібна установка конденсаторів. Потужність ІТП може досягати 4 500 кВт.

Усі плавильні печі належать до електроприймачів II категорії за ступенем надійності електропостачання.

Живлення установок підвищеної та високої частоти здійснюється від тиристорних або машинних перетворювачів індукторного типу.

**Індукційні тигельні печі середньої частоти нового покоління.** На сьогодні розроблено низку індукційних тигельних печей середньої частоти (далі ІПСЧ) для швидкісних плавлень чорних і кольорових металів, що відповідають сучасним вимогам металургійного та ливарного виробництва. Найкращі показники ефективності ІПСЧ здебільшого в чому визначаються шляхом оптимального вибору геометричних параметрів індуктора, частоти струму збудження та питомої активної потужності для плавлення певного металу, а також за допомогою фізичних характеристик і товщини футеровки.

Для плавлення чорних металів заводом виробляються тигельні печі серії ІПП ємністю від 60 до 400 кг, що працюють на частоті 2 400 Гц. Технічні характеристики цих печей наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики печей

Тип обладнання	Ємність тигля, т	Частота, Гц	Номінальна потужність, кВт	Час плавлення чугуна, хв	Питома витрата ел. електроенергії, кВт·ч/т
ІПП-0,06–2,4	0,06	2 400	100	45	540
ІПП-0,16–2,4	0,16	2 400	160	55	550
ІПП-0,25–2,4	0,25	2 400	250	55	550
ІПП-0,40–2,4	0,40	2 400	320	75	560

У разі високих питомих потужностей 800–1 000 кВт/т забезпечується висока швидкість підйому температури металу (оптимальні її



значення 30–35 °С/хв), що дає змогу скоротити цикли плавлення чавуну до 45 хвилин при питомій витраті електроенергії приблизно 560 кВт·год/т.

Печі цієї серії мають міцну конструкцію, каркас якої виконаний із неіржавої сталі. Індуктор виготовляється з прямокутної мідної трубки. Товщина стінки трубки обрана відповідно до умов міцності й мінімізації електротехнічних втрат. Витки індуктора фіксуються на вертикальних ізоляційних стійках. Ізоляція індуктора виконана у такий спосіб, щоб забезпечувався вихід вологи назовні під час просушування вологих футеровок. Подова частина печі виконується з литого армованого жаростійкого бетону. Розташування індуктора щодо тигля обрано так, щоб максимально зменшити зношення футеровки у верхній зоні за умови збереження гарантованого перемішування металу.

Для цих обсягів і робочої частоти в конструкції печей не передбачене установлення магнітопроводів, тому для зменшення нагрівання магнітними полями розсіювання корпусні елементи виконані з немагнітних металів.

Індукційні печі серії ІППМ розраховані на обсяги плавлення чорних металів від 1т до 10т. Печі цієї серії працюють на частотах 200–1000 Гц, їхні технічні характеристики наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики печей

Тип обладнання	Ємність тигля, т	Частота, Гц	Номінальна потужність, кВт	Час плавлення чугуна, хв	Питома витрата електроенергії, кВт·ч/т
ІППМ-1,0–1,0	1,0	1 000	750	60	540
ІППМ-2,5–0,5	2,5	500	1 100	80	560
ІППМ-6,0–0,25	6,0	250	7 000	60	530

На зовнішній стороні індуктора встановлюються магнітопроводи, що дають змогу підвищити напруженість магнітного поля в зоні розплавлення металу і збільшити ККД печі і, як наслідок, знизити витрати електроенергії до 500–520 кВт·год/т. Для зниження тепловтрат у печах цієї серії над тиглем установлена кришка з гідравлічним механізмом повороту.

### 3.3 Індукційні нагрівальні установки

Індукційні нагрівальні установки (далі ІНУ) широко застосовуються в різних технологічних процесах у машинобудівній та інших галузях промисловості. Їх підрозділяють на два головних типи: установки наскрізного та поверхневого нагрівання.

Установки для загартування та наскрізного нагрівання діляться залежно від призначення. Живлення установок підвищених та високих частот відбува-

ється від тиристорних або машинних перетворювачів. Установки належать до електроприймачів II категорії за ступенем надійності електропостачання.

Порівняно з іншими видами нагрівання (у полум'яних печах і печах резисторного нагрівання) індукційне нагрівання має мале вигорання металу та менший брак через попадання окалини в оброблюваний виріб. Індукційні установки наскрізного нагрівання застосовуються для нагрівання заготовок під подальшу пластичну деформацію: кування, штампування, пресування, вальцювання тощо.

Залежно від геометричних параметрів нагрітих деталей і їхнього матеріалу джерела живлення індукційних установок виконуються на частоту 50–10 000 Гц. Для установок наскрізного нагрівання вибір робочої частоти роблять так, щоб виділення теплоти відбувалося в шарі деталі достатньої товщини за перерізом за відсутності великого градієнта температури між поверхнею та шаром певної товщини. Де також буде менше перегрівання поверхні заготовки та вище ККД установки.

За режимом роботи установки наскрізного нагрівання поділяють на установки періодичної та безперервної дії.

В установках періодичної дії нагрівається тільки одна заготовка або її частина. Під час нагрівання заготовок із магнітного матеріалу відбувається зміна споживаної потужності, тобто спочатку вона зростає, а потім із досягненням точки Кюрі знижується до 60–70 % від початкової. Під час нагрівання заготовок із кольорових металів потужність у кінці нагрівання збільшується в наслідок зростання питомого електричного опору.

В установках безперервної дії (рис. 3.12) одночасно міститься декілька заготовок, розташованих у поздовжньому або поперечному магнітному полі.

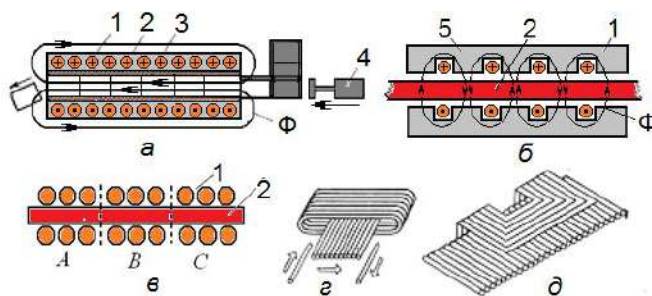


Рисунок 3.12 – Схеми індукційних нагрівальних установок безперервної дії в поперечному (а, б, в) і поздовжньому магнітному полі (г, д):

- 1 – індуктор; 2 – тіло, що нагрівається; 3 – теплоізоляція;
- 4 – штовхач; 5 – магнітопровід

У процесі нагрівання вони переміщуються за довжиною індуктора, нагріваючись до заданої температури (рис. 3.12, а; б). У нагрівачах безперервної дії повніше використовується потужність джерела живлення, оскільки середня

потужність, що споживана від джерела живлення, вище, ніж середня потужність, споживана нагрівачем періодичної дії.

*Індукційні нагрівачі безперервної дії* мають більш високий ККД джерела живлення. Продуктивність вище, ніж у установках періодичної дії. Можливо живлення декількох нагрівачів від одного джерела, а також підключення декількох генераторів до одного нагрівача, що складається з декількох секцій (рис. 3.12, в).

Конструкція індуктора для наскрізного нагрівання залежить від форми та розмірів деталей. Індуктори виконують круглого, овального, квадратного або прямокутного перерізу. Для нагрівання решт заготовок індуктори виконують за допомогою щілинних або петльових (рис. 3.12 з, д).

*Індукційний поверхневий нагрів* супроводжується проявом поверхневого ефекту й ефекту близькості. Унаслідок поверхневого ефекту струм у виробі, що нагрівається, розподіляється нерівномірно. Найбільша щільність струму спостерігається в поверхневих шарах виробів.

У разі використання високої частоти в поверхневих шарах можна отримати великі густини струму, що забезпечують швидке нагрівання металу.

Індукційні установки поверхневого нагрівання застосовуються для нагріву деталей під подальшу термохімічну обробку (гартування, цементация, азотування тощо).

*Індукційне загартування* полягає в швидкому нагріванні поверхні виробу з подальшим швидким охолодженням на повітрі, у воді або маслі. До того ж поверхня набуває високу твердість і здатна добре працювати на тертя, а «сире» (м'яке) осердя забезпечує високу опірність ударним навантаженням. У процесі такого нагрівання вдається у багато разів зменшити обсяг металу, що нагрівається (порівняно з наскрізним нагріванням) і значно скоротити витрату електроенергії. Необхідність підтримання високого електричного і теплового ККД системи індуктор – тіло, що нагрівається, визначає винятково велику кількість форм та розмірів індукторів. Схеми деяких індукторів для поверхневого нагріву наведені на рисунку 3.13.

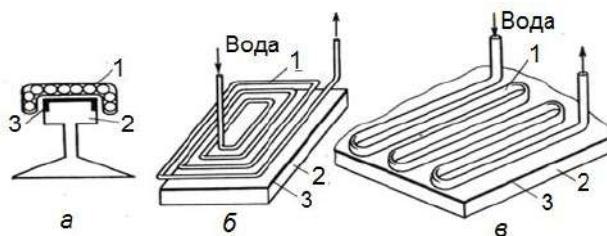


Рисунок 3.13 – Технологічні схеми поверхневого індукційного нагрівання:

1 – індуктор; 2 – виріб, що нагрівається; 3 – нагрітий шар виробу

Між індуктором і вогнетривким циліндром прокладений шар теплоізоляційного матеріалу, що знижує теплові втрати та захищає електричну ізоляцію індуктора.

Індукційні установки зазвичай мають низький коефіцієнт потужності, до того ж його значення змінюються в досить широких межах залежно від частоти струму, зазору між індуктором та виробом, магнітної проникності, питомого опору і розмірів нагрітих виробів. Залежність коефіцієнта потужності від частоти струму та діаметра нагрітих виробів дає змогу правильно вибрати компенсуювальну реактивну потужність конденсаторної батареї, керуючись не тільки мінімальною витратою електроенергії, але і зниженням вартості установки та скороченням необхідних виробничих площ.

### 3.4 Установки діелектричного нагріву

В установках для нагрівання діелектриків матеріал, що нагрівається, поміщається в електричне поле конденсатора і нагрівання відбувається за допомогою струмів зміщення. Ця група установок широко застосовується для клеєння та сушіння деревини, нагрівання прес-порошків, паяння та зварювання пластиків, стерилізації продуктів тощо (рис. 3.14). Живлення установок здійснюється за допомогою змінного струму з частотою у 20–40 МГц і вище. Установки належать до електроприймачів II категорії за ступенем надійності електропостачання.



Рисунок 3.14 – Установки діелектричного нагріву

Використання електричного струму, що проходить через діелектрики та напівпровідники в змінному електричному полі, є основою діелектричного нагрівання, який має переваги перед іншими способами нагрівання. Це швидкість, рівномірність і висока продуктивність. З енергетичної позиції таке нагрівання є найефективнішим, оскільки у процесі його здійснення вся енергія, що вноситься в масу матеріалу, нагрівається.

За технологічними ознаками установки височастотного нагрівання під-поділяються на три види.

*Установки першого виду* використовуються в процесах промислової обробки великих виробів, що потребують швидкого нагрівання в однорідному елек-

тричному полі: сушіння волокон вовни або бавовни, целюлози та лісоматеріалів, випал великих електроізоляторів та фарфорових виробів, виробництво звуко- і теплоізоляційних матеріалів, зварювання пластмас і полімерних плівок.

*Установки другого виду* застосовуються для нагрівання протяжних плоских виробів. У них відбуваються процеси сушіння текстильного волокна, рисуноків на тканинах, паперу, фотоплівки, хімічних і фармацевтичних препаратів, полімеризація клеїв, нагрівання каучуку, пастеризація тощо.

В *установках третього виду* проводяться процеси, що не вимагають швидкого й однорідного нагрівання, а саме: розморожування продуктів, розігрівання та швидке приготування страв, випалення простих керамічних виробів, сушіння грибів, чаю тощо.

Використання високоякісного нагріву дає змогу підвищити якість продукції, прискорити технологічні процеси й отримати при масовому виробництві велику економію, незважаючи на високу вартість обладнання.

### **Контрольні питання**

1. Для чого застосовується індукційне нагрівання?
2. Перелічити головні елементи та параметри індукційного нагрівання.
3. Пояснити призначення індуктивних плавильних печей.
4. Пояснити особливості роботи індуктивних плавильних печей
5. З чого складається індуктивна одиниця каналної плавильної печі?
6. Які існують види індукційних каналних печей і в чому полягає їхня особливість?
7. Призначення та особливості роботи індукційної тигельної печі.
8. Де використовуються індукційні нагрівальні установки?
9. Пояснити особливості роботи індукційної нагрівальної установки?
10. У чому полягає індукційне загартування?
11. Призначення установок діелектричного нагрівання.
12. Як класифікуються установки діелектричного нагрівання.

## 4 ЕЛЕКТРИЧНІ ДУГОВІ ПЕЧІ

- 4.1 Властивості дугового розряду.
- 4.2 Загальні відомості про дугові електричні печі та їхня класифікація.
- 4.3 Головні елементи дугових печей змінного струму.
- 4.4 Технології плавлення сталі в дугових печах.
- 4.5 Дугові печі непрямої дії.

### 4.1 Властивості дугового розряду

У низці електротермічних процесів, що перебігають із поглинанням великої кількості електроенергії, застосовується електродуговий розряд або електрична дуга, яка дає змогу нагрівати різні середовища до високих температур, які недосяжні при спалюванні палива.

Електрична дуга (рис. 4.1) є одним з явищ, що виникають під час проходження електричного струму через газ, пари або вакуум. У звичайних умовах гази не проводять електричний струм. Провідність виникає тільки тоді, коли в газовій чи іншому середовищі крім молекул і атомів з'являються вільні заряджені частинки – електрони, позитивні та негативні іони та газ перетворюється в плазму.

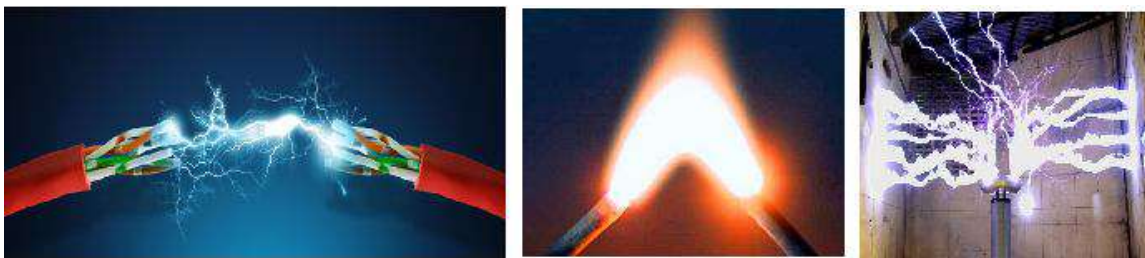


Рисунок 4.1 – Дуговий розряд

Плазмою прийнято називати речовину (рис. 4.2), що перебуває в стані, коли в речовині, крім нейтральних молекул і атомів є заряджені частинки – електрони та іони, які проводять електричний струм.



Рисунок 4.2 – Різновиди плазми



Головні етапи переходу газу в плазму: дисоціація (складання атомів) та іонізація (виникнення заряджених частинок). Заряджені частинки в розрядному проміжку утворюються за допомогою енергії зовнішнього джерела (самостійний розряд). Дуговий розряд характеризується високою щільністю струму в каналі розряду (близько  $10^2 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$ ), низьким катодним падінням напруги (менше 20 В), високою температурою газового середовища в міжелектродному просторі  $(3\text{--}5)10^3 \text{ К}$  і вище.

#### 4.2 Загальні відомості про дугові електричні печі та їхня класифікація

Електрична дугова піч – це піч, в якій використовується тепловий ефект електричної дуги для плавлення металів та інших матеріалів. Перші промислові дугові печі побудовані у 1898–1901 рр. П. Еру у Франції та Е. Стассано в Італії. У Росії перша дугова піч була встановлена в 1910 р. на Обухівському заводі в Петербурзі.

У ливарному виробництві дугові печі використовують для виплавлення сталі та чавуну з металевого брухту і для перегрівання рідкого чавуну, одержуваного у вагранках або інших первинних плавильних печах для виплавлення феросплавів і чавуну з руд, а також у хімічній промисловості – для виготовлення карбїду кальцію, фосфору та інших продуктів. У дугових печах можна одержувати високоякісний метал із низьким вмістом фосфору, сірки, кисню та інших шкідливих і небажаних домішок, отримувати леговані сталі з високим вмістом легувальних домішок. Дугові печі краще за інших пристосовані для переробки металевого брухту. Металізовані окатиші, що замінюють лом, можна завантажувати в електропіч безперервно за допомогою автоматичних дозувальних пристроїв.

Класифікація дугових електричних печей (рис. 4.3).

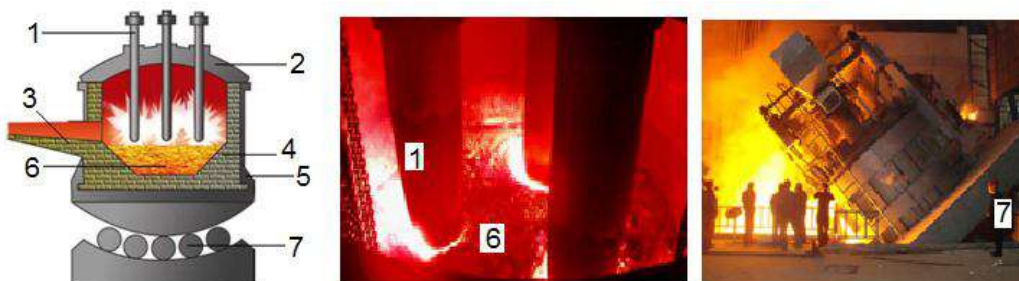


Рисунок 4.3 – Конструкція дугової печі

1 – електроди; 2 – арокне склепіння; 3 – желоб; 4 – футеровка; 5 – кожух печі;  
6 – розплавлений метал; 7 – механізм повороту

За родом струму: печі змінного та постійного струму.

За способом нагрівання:

- печі прямої дії, в яких електрична дуга горить між кінцями електродів і матеріалом, що розплавляється;

- печі непрямої дії, де електродуговий розряд горить між електродами, розташованими над матеріалом, що нагрівається. Теплообмін між електричною дугою та матеріалом здійснюється здебільшого шляхом випромінювання;

- печі із закритою дугою, в яких дуга горить під шаром твердої шихти, що оточує електроди. Шихта нагрівається теплом, що виділяється в дузі, а також джоулевим теплом, що утворюється під час проходження струму через шихту.

**Шихтові матеріали.** Головним складником шихти є сталевий брухт. Лом не повинен містити кольорових металів і повинен мати мінімальну кількість нікелю та міді; бажано, щоб вмісту фосфору в брухті не перевищував 0,05 %. За умови більш високого вмісті фосфору тривалість плавлення зростає. Лом не повинен бути дуже окисленим (іржавим), оскільки з іржею (гідратом окису заліза) вноситься в метал багато водню. Лом повинен бути важким, щоб забезпечувалася завантаження шихти в один прийом (однієї баддею). За умови легковажкого лому після часткового розплавлення першої порції шихти доводиться знову відкривати піч і підсаджувати шихту, що збільшує тривалість плавлення.

Останнім часом розширюється застосування металізованих окатишів та губчастого заліза – продуктів прямого відновлення збагачених залізних руд. Вони містять 85–93 % Fe, головними домішками є оксиди заліза,  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Відмітна особливість цієї сировини – наявність вуглецю від 0,2–0,5 до 2 % і дуже низький вміст сірки, фосфору, нікелю, міді та інших домішок. Це дає змогу виплавляти сталь, яка відрізняється підвищеною чистотою від домішок.

Переплав відходів легованих сталей дає змогу економити дорогі феросплави. Ці відходи сортують за хімічним складом і використовують під час виплавлення сталей, що містять ті самі легувальні елементи, що і відходи.

Для підвищення вмісту вуглецю в шихті використовують чавун, електродний бій. Як шлакоутворювальні елементи в основних печах застосовують вапно, вапняк, плавиковий шпат, боксит, шамотний бій; у кислих печах – кварцовий пісок, шамотний бій, вапно. Як окиснювачі використовують залізну руду, прокатну окалину, агломерат, залізні окатиші, газоподібний кисень.

#### 4.3 Головні елементи дугових печей змінного струму

Дугові сталеплавильні печі (ДСП, рис. 4.4) прямої дії призначені для виплавлення сталі в зливках для подальшого переділу в прокатних цехах, а також для отримання фасонного лиття, металургійної сировини, хімічних продуктів. Промисловістю освоєно випуск дугових печей місткістю 0,5; 1,5; 3; 6; 12; 25; 50; 100 і 200 т.

До складу печі також входять механізм електромагнітного перемішування металу у ванні; системи водяного охолодження, гідравлічного приводу механізмів, електрообладнання. Розглянемо коротко перелічені елементи ДСП.

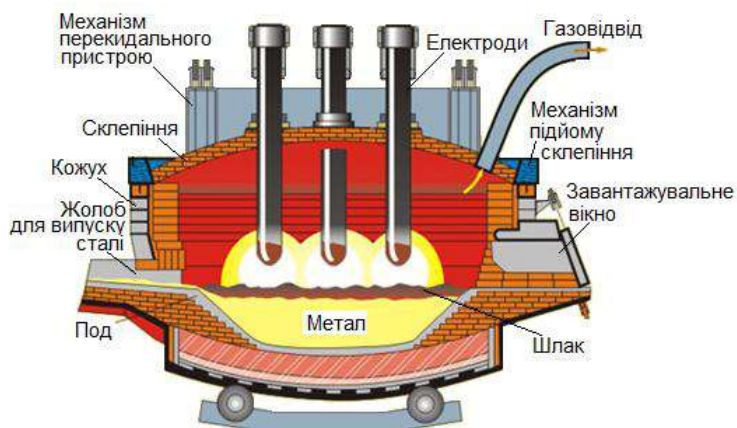


Рисунок 4.4 – Конструкція дугової сталеплавильної печі

**Каркас (кожух).** Усі навантаження від футеровки та рідкого металу, а в деяких конструкціях і від механізмів нахилу печі й підйому склепіння сприймаються каркасом печі. Каркас може бути циліндричної або конічної форми, злегка розширюється догори. Каркас зварюють з листової низьковуглецевої сталі й підсилюють ребрами жорсткості.

Товщина стінки каркаса залежить від місткості печі. Днище каркаса може бути плоским, конічним або сферичним. У каркасі вирізують отвори для завантажувального вікна та металевої льотки. На великих печах бічні стіни каркаса мають водяне охолодження. У низці випадків каркас печі вище рівня рідкого металу і становить окремі водоохолоджувані панелі, що з'єднані між собою болтами.

На поверхні панелі, зверненої в робочий простір печі, є ребра та голки, на які нанесений тонкий шар вогнетривкої маси. У подібних печах втрати енергії через стіни вище, ніж у печей без охолодження стін, але питома витрата енергії на тону виплавленого металу менше, оскільки що час плавки значно скорочується. Крім того, скорочуються прості печі, що обумовлюється з ремонтом футеровки стін.

**Механізм нахилу.** Для зливу металу піч нахиляють на 40–45 °С у бік зливного носка, а для скачування шлаку – на 10–15 °С у бік робочого вікна. Піч нахиляють із певною швидкістю механізмом з електромеханічним або гідравлічним приводом, що розташовується збоку від неї або під нею. Механізм нахилу печі місткістю 0,5; 1,5 і 3 т складається з двох гідравлічних циліндрів, розміщених під піччю.

До каркаса печі на болтах приєднані два литих сегменти, що встановлені на литі плити. На плитах і сегментах виконані зубці, що надійно фіксують піч у певному положенні. Піч нахиляють у процесі переміщення штока циліндрів, які шарнірно з'єднані з фундаментом і каркасом.

**Футеровка.** Головним елементом футеровки є под, який складається з декількох шарів. Перший його шар, дотичний із рідким металом і шлаком, набивний з вогнетривкого порошку. Під час кислого процесу використовують набивку з кварцового піску, під час основного – набивку з магнезитового порошку. Другий шар поду під час кислого процесу виконують із динасу, а під час основного – із магнезиту. Наступні шари складаються з шамоту, діатоміту та азбесту.

Стіни печей – багатошарові. Перший шар залежно від процесу викладають із динасової або магнезитової цегли, другий – зі шамотної цегли, третій – із діатомитового порошку, який, виконуючи роль теплоізоляції, одночасно компенсує розширення вогнетривів під час їх нагрівання і, отже, оберігає каркас від руйнування. Замість вогнетривких цеглин іноді застосовують набивні блоки, що виготовлені з кварцового піску або магнезитового порошку. У надпотужних сталеплавильних печей стіни з вогнетривів замінюють водоохолоджуваними панелями.

**Склепіння** має різну конструкцію. Відомі печі з водоохолоджуваним склепінням, в якому футеровка відсутня повністю чи зберігається тільки в центральній частині своду, де розташовані електроди. Склепіння виготовляють за допомогою спеціального шаблону з високоглиноземистої або електродинасової нормальної і фасонної цегли.

**Механізм переміщення своду.** У процесі завантаження печей застосовують спеціальні механізми для підйому і повороту склепіння. Найширше використовують метод завантаження зверху. Під час завантаження шихти склепіння разом з електродами піднімають і повертають на 80–100 °С. Відкриту піч завантажують за допомогою спеціальних завантажувальних кошиків. Із закінченням завантаження склепіння повертають у вихідне положення. Після цього може бути розпочато робочий цикл. У деяких печах склепіння після підйому залишається у піднятому положенні, а піч викочують з-під склепіння на позицію завантаження. Із закінченням завантаження піч встановлюють у початкове положення, а свод опускають. Механізоване завантаження шихти дає змогу підвищити продуктивність печі й заощадити електроенергію.

**Електроди** в дугових печах слугують для введення електроенергії всередину робочого простору печі, для розплавлення шихти й отримання необхідних матеріалів. Застосовуються вугільні або графітовані електроди. Вугільні електроди виготовляють з антрациту і коксу, а графітовані – зі штучного графіту в спеціальних електричних печах.

У сучасних печах зазвичай застосовуються графітовані електроди (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики електродів

Електроди									
Параметр	графітовані						вугільні		інші
Діаметр, мм <sup>2</sup>	150	300	400	500	600	700	150	300	600
Щільність струму, не більше, А/см <sup>2</sup>	26	19	16	15	10–15	10–13	12	10	30

Іноді застосовуються графітовані електроди діаметром у 100–1 200 мм, які виготовляють з антрациту, термоантрацитів (прожареного антрациту), нафтового коксу, кам'яновугільного пеку та смоли в спеціальних печах шляхом випалення заготовок без доступу кисню при температурі до 1600 К.

Вугільні електроди порівняно з графітованими мають меншу механічну міцність і більше питомий опір. Тому вугільні електроди зазвичай застосовують лише на малих печах місткістю до 3 т. У дугових печах застосовуються безперервно нарощувальні електроди. Вони мають круглий переріз і оброблені торці, в яких по осі є отвори з різьбою. В отворах загвинчені до половини своєї довжини ніпелі, які виконані з матеріалу електрода. На виступаючу з торця електрода половину ніпеля загвинчен наступний електрод. Таким способом виготовляється електродна свічка, що складається з декількох електродів. Електроди мають довжину 1 000–1 800 мм. Керування переміщенням електродів у процесі плавлення здійснюється в автоматичному режимі за допомогою електрогідравлічного регулятора.

**Електротримачі** (далі ЕТ) – це елементи, які призначені для утримання електродів і підведення до них струму. Кожен ЕТ закріплений на стійці, яка може переміщатися у вертикальному напрямку. ЕТ по'язані з механізмом переміщення електродів. Струм підводиться до ЕТ за допомогою пакету мідних шин або водоохолоджуваних труб.

Установлення електромагнітного перемішування металу дають змогу прискорити виведення шкідливих газів і компонентів з розплаву, вирівняти хімічний склад розплаву. Рідкий метал у ванні приводиться в рух за допомогою електромагнітних пристроїв змінного струму який перемикається з магнітним полем при частотах 0,4–1,0 Гц. Промислові установки електромагнітного перемішування складаються з трьох компонентів: індуктора, джерела живлення та системи охолодження. Індуктори електромагнітного перемішування виконують у вигляді циліндричних або плоских конструкцій. У першому випадку індуктори розташовуються на бічній поверхні корпуса, у другому – під донною повер-

хнею. Потужність індукторів становить 0,5–0,6 кВт, коефіцієнт потужності – 0,5–0,6, напруга фази – 115–180 В.

Як джерела живлення індукторів використовують електромагнітні перетворювальні агрегати та тиристорні перетворювачі частоти. Охолодження статора проводиться водою, якщо він виготовлений із мідної трубки, або повітрям, по спеціальним каналам усередині обмотки. Вартість установки електромагнітного перемішування металу становить 30–100 % вартості печі, а витрата енергії в ній на 1 т виплавленої сталі – 3–5 % від повної витрати енергії.

Електрообладнання печі складається з пічного трансформатора, дроселів, комутаційно-захисної апаратури. Конструкція дугових печей має місткість 0,5–3 т.

#### 4.4 Технології плавки сталі в дугових печах

Технологія плавлення сталі в дугових печах залежить від шихтових матеріалів, що використовуються, ємності печі, необхідної якості сталі. Нижче розглянуті деякі технології.

**Плавлення в основній печі на вуглецевій шихті.** Ця технологія застосовується на печах малої та середньої ( $\leq 40$  т) ємності у процесі виплавлення якісних легованих сталей. Плавка складається з таких періодів: заправлення печі; завантаження шихти; плавлення; окислювальний період; відновний період; випуск сталі.

*Заправка печі* – це виправлення зношених і пошкоджених ділянок футеровки поду. Після випуску чергової плавки з подиної видаляють залишки металу і шлаку. На пошкоджені подиної й укуси закидають магнезитовий порошок. Тривалість заправки становить 10–15 хв.

*Завантаження шихти.* У процесі виплавлення сталі в печах малої та середньої ємності шихта на 90–100 % складається зі сталевих брухту. Для підвищення змісту вуглецю в шихту вводять чавун ( $< 10$  %), а також електродний бій або кокс. Щоб вмістити видалення частини фосфору під час плавлення шихти, в завалку рекомендується давати 2–3 % вапна. Завантаження ведуть бад'ями або кошиками. Необхідна щільна укладка шихти, це покращує її провідність, забезпечує стійке горіння дуги, прискорює плавлення. Для зменшення угару кокс і електродний бій кладуть під шар крупного брухту.

*Плавлення.* Після закінчення завалки електроди опускають майже до дотику з шихтою та включають струм. Під дією високої температури дуги шихта під електродами плавиться, рідкий метал стікає вниз, накопичуючись у центральній частині подиної. Електроди поступово опускаються, проплавляючи в шихті «колодязі» і досягаючи крайнього нижнього положення. За збільшенням кількості рідкого металу електроди піднімаються. Це досягається за допомогою



автоматичних регуляторів для підтримання певної довжини дуги. Плавлення ведуть за максимальної потужності трансформатора.

Під час плавлення відбувається окислення складових шихти, формується шлак, відбувається часткове видалення в шлак фосфору та сірки. Окислення домішок здійснюється за допомогою кисню повітря, окалини та іржі, внесених металевою шихтою.

Для прискорення плавлення іноді застосовують газокисневі пальники, що вводяться в робочий простір через або під стінки печі, що дає змогу вводити в рідкий метал кисень. При витраті кисню 4–6 м<sup>2</sup>/т тривалість плавлення скорочується на 10–20 хв.

Тривалість періоду плавлення визначається потужністю трансформатора і становить від 1,1 ч до 3,0 ч. Витрата електроенергії за час плавлення становить 400–480 кВт·год/т.

**Окислювальний період.** Завданням окисного періоду є зменшення вмісту фосфору в металі до 0,01–0,015 %; водню та азоту, а також нагрівання металу до температури, близької до температури його випуску.

Крім того, за цей час періоду окислюють вуглець до нижньої межі його змісту у виплавленій сталі. Шляхом кипіння (виділення бульбашок СО при окисленні вуглецю) відбувається дегазація металу та його перемішування, що прискорює процеси дефосфорації та нагрівання. Окислення домішок ведуть, використовуючи або залізну руду (окаліну, агломерат), або газоподібний кисень. За весь час плавлення та окисного періоду в шлак видаляється до 30–40 % сірки, що міститься в шихті. У процесі кипіння разом із бульбашками з металу видаляються водень і азот. Цей процес має велике значення для підвищення якості сталі, оскільки в електропечі в зоні електричних дуг іде інтенсивне насичення металу азотом і воднем. У зв'язку з цим сталь зазвичай містить азоту більше, ніж мартенівська та киснево-конвертерна сталь.

Окислювальний період закінчується тоді, коли вуглець окислюється до нижньої межі його змісту у виплавленій марці сталі, а вміст фосфору знижено до 0,01–0,015 %. Період закінчують зливанням окисного шлаку. У разі повного завантаження окисного шлаку необхідно, щоб фосфор, що міститься в ньому, не перейшов назад у метал під час відновлювального періоду.

**Відновлювальний період.** Завдання відновлюваного періоду: розкислення металу та видалення сірки; доведення хімічного складу сталі до заданого; коректування температури; введення в метал потрібних легувальних компонентів.

Розкислення металу проводиться з метою отримання необхідних властивостей сталі, зменшення вмісту оксидів заліза в шлаку, отримання сталі зі знизеним вмістом неметалічних включень. У відновний період печі, у певній послідовності використовують феромарганець, феросиліцій, вапно, плавииковий шпат і шамотний бій тощо.

Для поліпшення перемішування шлаку і металу та зменшення інтенсифікації у відновлений період, рекомендується застосовувати електромагнітне перемішування, особливо на великовантажних печах, де питома поверхня контакту металу зі шлаком значно менше, ніж в печах малої ємності.

Тривалість оновленого періоду становить 40–100 хв. За 10–20 хв до випуску проводять коригування змісту кремнію в металі, уводячи в піч кусковий феросиліцій. Для кінцевого розкислення за 2–3 хв до випуску в метал присаджують 0,4–1,0 кг алюмінію на 1 т сталі. Випуск сталі з печі в ківш виробляють спільно зі шлаком. Інтенсивне перемішування металу зі шлаком у ковші забезпечує додаткове рафінування – з металу в білий шлак переходить сірка і неметалеві включення.

У процесі виплавлення легованих сталей у дугових печах у кінці періоду розплавлення в сталь уводять легувальні домішки. Хром і марганець уводять у метал після зливання окисного шлаку на початку відновного періоду, нікель у завалку, а молібден наприкінці плавлення чи початку окисного періоду. Вольфрам уводять на початку відновного періоду, не пізніше ніж за 30 хвилин до випуску. Легування сталі ферованадієм відбувається за 15–35 хв до випуску, феросиліцієм – за 10–20 хв до випуску. Феротитан уводять у піч за 5–15 хв до випуску або в ківш. Алюміній уводять через 2–3 хв до випуску в ківш. Після легування метал виливається в ківш для розливання сталі.

**Тривалість плавлення.** Плавлення у великих печах триває 4–6 год: із них 1,5–2,5 год триває розплавлення і 2–4 год – окислення та рафінування металу. Режим роботи печі та стадії технологічного процесу можуть бути різними і залежно від виду скрапу, шихти, складу футеровки, застосування легувальних компонентів.

**2. Виплавлення сталі методом переплаву.** На металургійному заводі відходи легової сталі, розливної у виливниці, становить 25–40 %. Із накопиченням відходів виплавляють сталь методом переплавлення. Плавлення ведуть без окислення або з нетривалим продуванням киснем, що дає змогу зберегти значну частину у відходах цінних легувальних елементів, що містяться в них.

У процесі плавлення без окислення вуглець і фосфор не окислюються, тому вміст фосфору в шихті не повинно бути вище його допустимих меж у готовій сталі, а вміст вуглецю на 0,05–0,1 % нижче, ніж у готовій сталі. У шихту крім легованих відходів уводять м'яке залізо – шихтову заготовку з низьким вмістом вуглецю та фосфору та, у процесі необхідності, ферохром і феровольфрам.

Завантаження і плавлення шихти проводять як під час звичайного плавлення. У період плавлення завантажують 1–1,5 % вапна або вапняку. Після розплавлення шлак, зазвичай, не стягують, відразу приступаючи до проведення відновного періоду. До того ж розкислення, десульфурацію та легування металу

виробляють звичайним способом. Під час дифузійного розкислення зі шлаку відновлюється хром, вольфрам і ванадій. Якщо після розплавлення шлак вийшов густим через високий вміст окису магнію, то його скачують і наводять новий.

У процесі виплавлення сталі методом переплавлення скорочується витрата електроенергії та електродів.

**3. Виплавлення високоякісних сталей за спрощеною технологією з подальшим позапічним рафінуванням сталі.** Використовуються такі технології:

- плавлення з рафінуванням металу в ковші за допомогою пічного шлаку;
- плавлення з рафінуванням в ковші за допомогою синтетичного шлаку;
- технологія з продуванням у ковші із використанням порошкоподібних реагентів;
- плавлення з рафінуванням і доведенням металу поза печі.

Загальним для всіх різновидів другого напрямку технології є прагнення використовувати великі печі переважно для розплавлення шихти, нагрівання металу і проведення окислювальних процесів – дефосфорації та зневуглицювання; іноді в печі проводять також легування та формування необхідного перед випуском складу шлаку.

**4. Плавлення з використанням металізованих окатишів.** Основу окатишів (губки) становить залізо зі змістом вуглецю від 0,2–0,5 % до 2 %, вони містять також певну кількість не відновлених оксидів заліза і пусту породу (переважно  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), кількість якої повинна бути не більше 3–7 % від маси окатишів. Відмітна особливість цієї сировини – малий вміст сірки, фосфору, міді, нікелю, хрому й інших домішок, що зазвичай містяться в сталевому ломі. Це полегшує і спрощує процес виплавки та одержання сталі високої якості та ступеня чистоти (сумарний вміст домішок у сталі виходить у кілька разів менше, ніж під час виплавлення зі сталевого брухту).

Якщо вміст металізованих окатишів в шихті не перевищує 25–30 % від її маси, то технологія електроплавлення істотно не відрізняється від звичайної. Переробка шихти, основу якої становлять металізовані окатиші, потребує застосування специфічної технології. Особливостями цієї технології є такі:

- безперервне завантаження окатишів зі швидкістю, пропорційної до електричної потужності, що підводиться в піч, до того ж завантаження повинне починатися після появи в печі ванни рідкого металу;
- суміщення періоду плавлення з окислювальним;
- спрощення технології плавки у зв'язку з малим вмістом у шихті шкідливих домішок – сірки та фосфору.

Ступінь металізації окатишів повинна перебувати в певних межах, що забезпечують кипіння ванни в процесі їх завантаження та плавлення. Оптима-

льний вміст окатишів у шихті становить 60–70 % від її маси. При більшому їх утриманні зростає тривалість розплавлення та плавки загалом.

Плавлення починають із завантаження сталевих брухтів, який у кількості 30–40 % від маси металевих шихт завантажують у піч однією порцією. Далі подають напругу та після розплавлення брухтів, що сформувався в рідку ванну, починають безперервне завантаження окатишів. Зазвичай їх завантажують у зону електричних дуг за допомогою автоматизованої системи через отвір у склепінні печі. Швидкість подачі окатишів узгодять з електричною потужністю, що підводиться в піч у такий спосіб, щоб температура ванни була на 30–40 °C вище температури плавлення металу.

Період завантаження та розплавлення поєднують з окислювальним, тобто проводять його так, щоб забезпечити безперервне окислення вуглецю (кипіння ванни). До того ж унаслідок перемішування прискорюється плавлення окатишів, забезпечуються дегазація ванни й отримання в кінці періоду заданого вмісту вуглецю в металі.

У процесі плавлення в піч завантажують вапно для шлакування кислої пустої породи окатишів. Основа шлаку, у зв'язку з низьким вмістом в окатишах сірки та фосфору, може бути меншою, ніж при плавлі на шихті зі сталевих брухтів і становити 1,5–2,0. У кінці періоду плавлення необхідно отримати необхідну у виплавленої сталі вміст вуглецю. За умови нестачі вуглецю вдаються до вдування у ванну карбюризаторів, надлишковий вуглець окислюють шляхом короткочасного продування киснем.

Після закінчення плавлення застосовують різні варіанти ведення завершальної частини плавлення. Один із них – нагрівання металу до необхідної температури та випуск у ківш, де виробляють позапічне доведення сталі та її рафінування. Інший – проведення в печі короткочасного доведення, протягом якого проводять нагрівання, розкислення та легування.

**5. Виплавлення сталі в кислих дугових печах.** Електричні печі з кислою футеровкою зазвичай використовують у ливарних цехах під час виплавлення сталі для фасонного лиття. Перевагою кислих печей, порівняно з основними, є більш висока стійкість футеровки. Водночас вартість кислих вогнетривів приблизно в 2,5 рази нижче вартості основних. У процесі плавлення сталі для фасонного лиття відновлювальний період зазвичай відсутній, тривалість плавки менше, ніж в основній тієї самої ємності. З цієї причини, а також у зв'язку з меншою теплопровідністю кислої футерівки, більш низьким є і витрата електроенергії. Головним недоліком кислих печей є те, що під час плавлення металу не видаляється сірка та фосфор.

**Видалення газів.** Під час плавлення з електропечі виділяється велика кількість запиленого газу. Температура газу становить 900–1 400 °C, вміст пилу в період продування ванни киснем становить до 100 г/м<sup>3</sup> газу. Кількість газу,

що виділяються, наприклад, із печі ємкістю 100 т у період продування киснем, досягає 9–10 тис. м<sup>3</sup>/год. Для створення нормальних умов роботи в сталеплавильному цеху необхідні уловлювання та очищення відхідних газів.

У старих цехах із печами малої ємності застосовуються відсмоктувальні парасольки, які встановлені над склепінням. Однак вони громіздкі, не забезпечують повне згоряння газів. На сьогодні відводять гази через отвір у склепінні з подальшим очищенням від пилу. Найпоширеніша є мокра газоочистка з використанням труб Вентурі. Технічні характеристики деяких ДСП змінного струму прямої дії наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики ДСП змінного струму

Тип печі	Номинальна потужність трансформатора, кВ·А	Напруга первинної обмотки, кВ	Межі виміру $U_2$	Струм вторинної обмотки, кА	Питома витрата електричної енергії кВт·ч/т
ДС-0,5	400	6; 10	213–110	1,085	650
ДСП-0,5ІЗ	630	6; 10	216–98	нд	560
ДСП-1,5	1 000	6; 10	225–118	2,57	550
ДСП-1,5ІЗ	1 250	6; 10	225–103	нд	480
ДСП-3	1 800	6; 10	242–122,5	2,25	525
ДСП-6ІЗ	2 000	6; 10	243–116	нд	465
ДСП-6	2 800	6; 10	257–197,5	6,3	нд
ДСП-12	5 000	6; 10	278–202	10,4	500
ДСП-12НЗ	8 000	6; 10	318–120	нд	435
ЖДСП-20	9 000	6; 10	318–116	16,35	470
ДСП-25	16 000	6; 10	384–148	24–10	нд
ДСП-25Н2	15 000	35	370–128	нд	430
ДСП-40	15 000	35	386–126	23,5	нд

#### 4.5 Дугові печі непрямої дії

Дугова піч непрямої дії призначена для переплавлення кольорових металів і їхніх сплавів, а також для виплавлення деяких сортів чавуну та нікелю. Її головна перевага – це невеликий вигар металу, оскільки електродуговий розряд не стикається безпосередньо з матеріалом, що переплавляється. Однофазна дугова піч непрямої дії (рис. 4.5) становить горизонтально розташовану ванну, яка футерована зсередини вогнетривом. У протилежних бічних стінках встановлені графітовані електроди, що переміщуються у процесі обгорання, механізмами подачі. Матеріал завантажують на дно ванни через отвір у бічній поверхні корпусу.

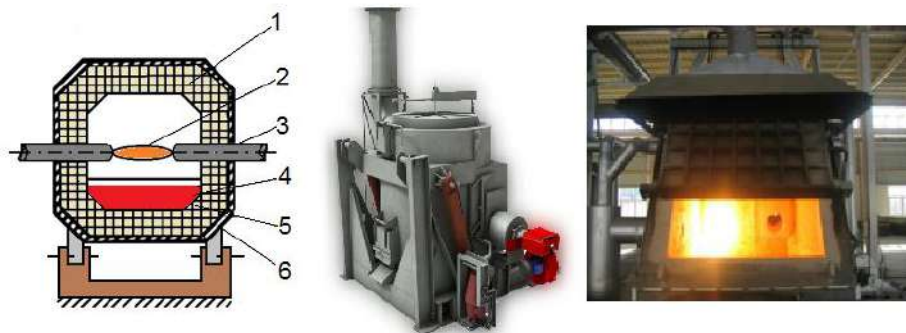


Рисунок 4.5. Схема і конструкції дугової печі непрямого дії  
1 – корпус; 2 – електрична дуга; 3 – електроди; 4 – матеріал;  
5 – футерівка; 6 – кожух

На електроди подається напруга, потім вони зводяться до дотику і виникненню струму в ланцюзі й потім розводяться, що призводить до виникнення електричної дуги. Унаслідок поглинання енергії, що виділяється дугою, відбувається нагрів і розплавлення металу. Після розплавлення металу піч нахиляється механізмом нахилу та з неї зливається розплав. Регулювання потужності печі здійснюється шляхом зміни струму і довжини дуги.

До електрообладнання дугових печей належать: пічний трансформатор, регулювальний реактор та електропривод механізму подачі електродів. Струм до електродів підводиться за допомогою гнучких кабелів від пічного трансформатора. Регулювання відстані між електродами здійснюють за допомогою електроприводу, керованого персоналом дистанційно, або автоматичним регулятором режиму. Дугові печі непрямої дії виробляють ємністю 0,25 та 0,5 т. Вони забезпечені трансформаторами потужністю 175–250 і 250–400 кВ·А.

Режим роботи дугової печі залежить від режиму процесу плавлення. Під час розплавлення металевих брухтів піч працює на максимальній потужності. У процесі доведення рідкого металу до потрібного хімічного складу потужність печі порівняно знижується.

Режим печі регулюється шляхом зміни напруги на електродах або зміни довжини дуги, тобто сили струму. Для зміни напруги, що підводиться до печі, трансформатор забезпечується пристроєм регулювання напруги, для чого на первинній його обмотці передбачається одне основне та декілька додаткових відгалужень (для малих печей передбачають 2–4 ступені регулювання напруги; для великих – до 25 ступенів). Зміна довжини дуги здійснюється шляхом опускання або піднімання електродів за допомогою автоматичної системи. Піч підключають до трифазної мережі промислової частоти напругою у 6–35 кВ. З метою зменшення втрат електроенергії пічні трансформатори встановлюють на мінімальній відстані від печі. У ланцюг високої напруги включається реактор (дросьель), який обмежує силу струму у разі короткого замикання електродів на метал.



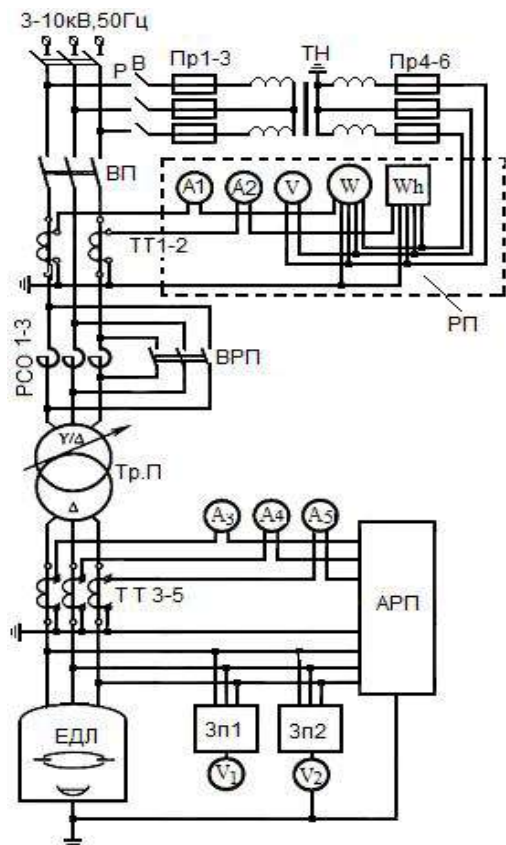
До основного електрообладнання ДСП належать: – печі з електродами та ванною; – знижувальний трансформатор; – дроселі; – коротку мережу; – комутаційну, вимірювальну і захисну апаратуру. Принципова електрична схема електрообладнання печі наведена на рисунку 4.6.

Первинний ланцюг печі складається з послідовно з'єднаних проводів і апаратів високої напруги, дроселя та первинної обмотки трансформатора. Вторинний ланцюг складається з послідовно з'єднаних вторинної обмотки трансформатора, струмопроводів короткої мережі, що з'єднують вторинні виводи трансформатора з електродами печі; електродів і електричних дуг.

Електропостачання трансформаторів пічної підстанції здійснюється від мережі 6(10)–35 кВ, а для потужних підстанцій – 110 кВ. Ланцюг вимірювання та захисту підключені до трансформаторів струму і напруги.

Для підтримання оптимального режиму роботи печі встановлюються автоматичні регулятори потужності. Такі регулятори впливають на механізм пересування електродів, змінюють довжину дуги та підтримують задане значення потужності дугової печі. Для підвищення точності регулювання створені автоматизовані системи керування ДСП.

Пічні трансформатори для печей невеликої та середньої потужності виконують трифазними. Для печей великої потужності застосовуються групи однофазних трансформаторів, які дають змогу отримати підвищений коефіцієнт потужності за допомогою раціональнішої конструкції короткої мережі й незалежного регулювання потужності та напруги кожної фази.



РП – розподільний пристрій;  
Тр.П – трансформатор пічний;  
А1 – А5 амперметри;  
Р – раз'єднувач;  
ВП – вимикач печі силовий ВН;  
ВРП – вимикач реактора печі;  
РСО 1-3 – реактор струмообмежувальний;  
В – вимикач ТН;  
Зп1 – Зп2 – запобіжники;  
АРП – автоматичний регулятор потужності;  
ТН, ТТ – трансформатори напруги і струму вимірювальні;  
Wh – лічильник активної енергії;  
W – ватметр;  
V<sub>1</sub> і V<sub>2</sub>, V – вольтметри;  
П1 і П2 – перемикачі;  
ТТ1–ТТ5 – трансформатори;  
ЕДЛ – електричний дугувий ланцюг

Рисунок 4.6 – Принципова електрична схема електроживлення і контролю ДСП

Пічні трансформатори мають такі особливості:

- високе значення номінального струму на стороні низької напруги (до десятків і сотень кілоампер);
- великий коефіцієнт трансформації;
- кількість ступенів і діапазон регулювання напруги набагато більша, ніж у силових трансформаторів (напруга регулюється приблизно на 500 %);
- трансформатори володіють високою стійкістю проти експлуатаційних коротких замикань із кратністю струму  $(2,5-3)I_N$ , мають високу механічну міцність.

Потужні пічні трансформатори мають примусове охолодження зі штучною циркуляцією масла через теплообмінник, забезпечені пристроями РПН, що виробляють до 160 перемикачів на добу.

Обмотки трифазних трансформаторів з'єднуються за схемою «трикутник–трикутник» із можливістю перемикачів за схемою «трикутник–зірка», що дає змогу переводити піч із лінійної напруги на фазу.

Регулювання напруги на електродах печі та її електричних характеристик здійснюється за допомогою пристрою ПБЗ або РПН регуляторів. Перемикач без збудження застосовується на пічних трансформаторах малої та середньої потужності. У трансформаторах великої потужності перемикач здійснюється

під навантаженням, для чого трансформатор забезпечується автоматичним регулятором напруги.

Реактор (дросель), слугує для обмеження кидків струму у разі експлуатаційних коротких замикань та стабілізації горіння дуг шляхом створення падаючої характеристики ланцюга живлення. У працюючих безперервно дугових печах режим роботи дроселя переривчастий, умови роботи важкі, тому він повинен задовольняти підвищеним вимогам термічної та механічної міцності. Дросель включається між мережею та лінійними затискачами обмотки високої напруги трансформатора або у «фазу» – послідовно з цією обмоткою. Зазвичай дросель розташовують у загальному кожусі з пічним трансформатором. *Короткої мережею* називають струмопровід від висновків вторинної боку трансформаторів до електродів дугової печі. Коротка мережа складається з ділянок жорстко закріплених шинопроводів і гнучких проводів, що з'єднують кінці шинопроводів з електродами. Струмопроводи короткої мережі пропускають дуже великі струми (до 100 кА і вище).

Незважаючи на невелику довжину короткої мережі, її активний та особливо індуктивний опір є визначальним складником загального опору ділянок пічної установки. Вони істотно впливають на енергетичні показники роботи печі: потужність, коефіцієнт потужності, ККД тощо.

### Контрольні питання

1. Пояснити явище виникнення електричної дуги та її особливості.
2. Що таке собою дугова піч? Пояснити її призначення.
3. У чому полягає класифікація дугових печей?
4. Що належить до шихтових матеріалів?
5. Які головні елементи входять до складу дугових печей змінного струму?
6. У чому полягає технологія плавлення сталі в дугових печах?
7. Що таке окислювальний та відновлений періоди під час плавлення металу?
8. Які існують методи виплавлення сталі?
9. Пояснити призначення дугових печей непрямої дії.
10. Що належить до електрообладнання дугових печей непрямої дії?
11. Яку роль грають пічні трансформатори?
12. Пояснити призначення реактора в ланцюзі електрообладнання печі.

## **5 ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ**

- 5.1 Класифікація електрозварювальних установок.
- 5.2 Класифікація зварювальних дуг та їхні характеристики.
- 5.3 Джерела живлення зварювальної дуги.
- 5.4 Зварювальні трансформатори.
- 5.5 Зварювальні випрямлячі.
- 5.6 Зварювальні генератори постійного струму.
- 5.7 Контактні електрозварювальні установки.
- 5.8 Електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання.
- 5.9 Електрозварювальні установки як приймачі електричної енергії.

### **5.1 Класифікація електрозварювальних установок**

Електрозварювальні установки, призначені для забезпечення технологічного процесу одержання нероз'ємних з'єднань окремих деталей за допомогою місцевого розплавлення матеріалів, доведення їх до пластичного стану або спільного деформування, що сприяє міцним зв'язкам між сполуками на молекулярному рівні. Більшість таких установок використовують явище перетворення електричної дуги в теплову енергію у місці з'єднання деталей. У деяких установках (наприклад ультразвукових) нероз'ємне з'єднання досягається шляхом пластичного деформування внаслідок перетворення електричної енергії в механічну. Деякі установки, крім головних функцій, також можуть виконувати операції різання, напилення, наплавлення.

Електрозварювальні установки загалом складаються зі спеціальних електрозварювальних елементів, а також мають елементи загального призначення у вигляді електротехнічних, механічних, пневматичних і гідравлічних пристроїв, кабельних ліній тощо.

Комплекс обладнання, пристосованого для забезпечення електротехнологічних процесів електрозварювання та робочого місця зварника називається зварювальним постом. Від одного джерела струму може оживлятися як один зварювальний пост, так і декілька постів.

Електрозварювальні установки класифікуються за такими ознаками:

- за родом струму: постійний, змінний;
- за способом перетворення електроенергії: дугові, контактні, електрошлакові, високочастотні, електронно-променеві, плазмові, лазерні;
- за джерелом живлення: автономні, які мають індивідуальний двигун внутрішнього згоряння (бензиновий або дизельний); установки, що одержують живлення від електричних мереж і пересувних електростанцій;
- за способом установа: стаціонарні й пересувні;

– за ступенем автоматизації: ручного, напівавтоматичного й автоматичного керування.

Перші електрозварювальні установки з'явилися у 1882 р. за допомогою російського винахідника Н. Н. Бернадоса (рис. 5.1), який теоретично обґрунтував і експериментально досліджував процеси електрозварювання металів за допомогою вугільного електроду. У 1888 р. російський інженер Н. Р. Славянов (рис. 5.2) запропонував електрозварювальну установку з металевим електродом.



Н. Н. Бернадос  
(1842–1905 рр.)

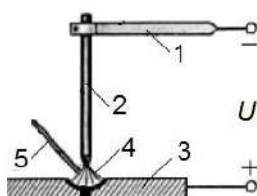


Рисунок 5.1 – Установка з  
вуглевим електродом



Н. Г. Славянов  
(1854–1897рр.)

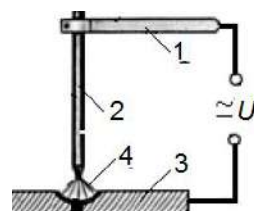


Рисунок 5.2 – Установка з  
металевим електродом

1 – тримач електроду; 2 – вуглевий електрод;  
3 – деталі зварені; 4 – електрична дуга; 5–присадний матеріал

За час створення електрозварювальних установок відбулися істотні зміни. На сьогодні головними режимами дугового електрозварювання деталей є такі:

– *режим дугового зварювання покритим електродом, що плавиться.* У цьому режимі зварний шов створюється шляхом розплавлення дугового електродного покриття і матеріалу деталей, що зварюються. У процесі зварювання електродне покриття плавиться і створює шлак, який захищає розплавлений метал від дії кисню та азоту навколишнього середовища, а також сприяє видаленню з розплавлених металів шкідливих домішок;

– *режим зварювання електродним дротом у середовищі газу або газової суміші.* У процесі такого зварювання електродний дріт надходить у зону горіння електричної дуги механізованим способом, плавиться і створює зварювальний шов. Також у зону горіння дуги подається вуглекислий газ або суміш газів, що сприяє захисту розплавленого матеріалу від дії атмосферного повітря, окислювання й азотування;

– *режим зварювання під шаром флюсу*. Під час такого зварювання електрична дуга горить між електродом, що плавиться, і металом деталей, що зварюються. Після затвердіння металу створюється якісний зварний шов.

– *режим аргонодугового зварювання електродом, який не плавиться*. При такому режимі між електродом і металом деталей, які зварюються, виникає електрична дуга. До того ж цьому утворюється ванна розплавленого металу. У зону горіння дуги надходить аргон, струмінь якого обтікає дугу та розплавлену ванну, захищає її від атмосферного повітря, окислювання й азотування.

## **5.2 Класифікація зварювальних дуг та їхні характеристики**

В електротехнічних установках розрізняють такі види дуг:

*а) за особливостями навколишнього середовища*, в якій відбувається дуговий розряд:

– відкрита – горить на повітрі з сумішшю парів металу електрода та деталей, які зварюються, а також матеріалу покриття електрода. Застосовується переважно під час ручного зварювання;

– закрита – яка горить під шаром захисного флюсу без доступу повітря в парах металу електроду, зварювальних деталей і флюсу. Застосовується здебільшого під час напівавтоматичного й автоматичного зварювання деталей.

– захищена – яка горить у середовищі захисних газів: аргону, вуглекислого газу, гелію, азоту, водню тощо. Застосовується як під час ручного зварювання, так і під час автоматичного, а також з електродом, що плавиться та не плавиться.

*б) залежно від матеріалу та фізичного стану електрода* в процесі горіння: з металевим електродом, що плавиться; з електродом, який не плавиться (вугільний, вольфрамовий, керамічний тощо);

*в) за характером дії дуги на деталі*, які зварюються: прямий і непрямий.

Головною характеристикою зварювальних дуг, від яких залежить вибір джерела живлення та забезпечення умов надійного горіння дуги, є вольтамперна характеристика – залежність дуги від сили струму при постійному значенні довжини дуги (рис. 5.3).



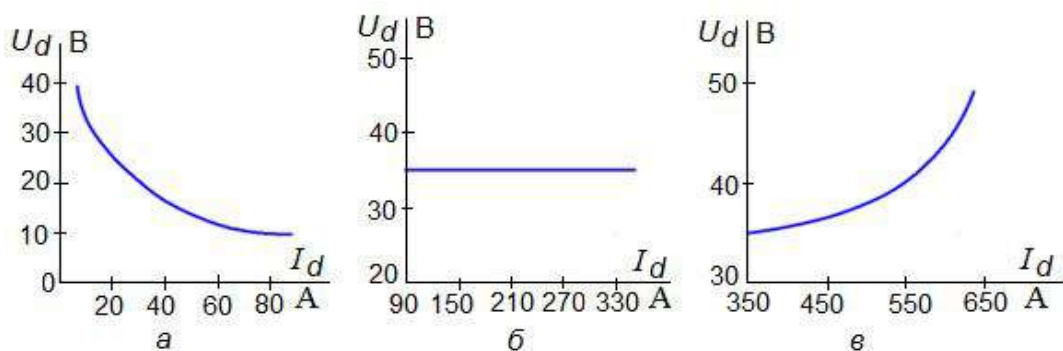


Рисунок 5.3 – Статичні вольтамперні характеристики дуги:  
 а) – що спадає (до 80 А); б) – жорстка (80–350 А), в) – зростаюча (від 350 А)

Статичні вольтамперні характеристики дуги визначають вигляд і спрямованість процесу, що відбувається в залежності від навколишнього середовища та фізичного складу матеріалу електрода.

### 5.3 Джерела живлення зварювальної дуги

В електрозварювальних установках джерелами живлення дуги можуть бути трансформатори, випрямлячі, генератори.

Залежно від роду струму джерела живлення розрізняють: змінного струму (зварювальні трансформатори, електромашинні генератори) і постійного струму (зварювальні випрямлячі й електромашинні генератори).

За способом встановлення джерел живлення розрізняють: стаціонарні і переміщувальні.

За призначенням: спеціальні й універсальні.

Залежно від потужності: малої, середньої, великої потужності.

Залежно від постів зварювання: одно- та багатопостові.

До головних параметрів джерел живлення установок належать: напруга мережі живлення; частота, коефіцієнт потужності, номінальний зварювальний струм, діапазон регулювання зварювального струму, напруга неробочого ходу (далі НР), кількість ступенів регулювання, тривалість включення.

До джерел живлення висуваються такі вимоги:

1. Напруга НХ повинна бути безпечною для обслуговчого персоналу, а з іншого боку – достатньою для надійного загоряння електричної дуги.

2. Після виникнення дуги напруга повинна зменшуватись до значення, що забезпечує надійне горіння дуги.

3. Джерело живлення повинне забезпечувати можливість регулювання зварювального струму.

4. У разі виникнення КЗ струм не повинен перевищувати робочі значення струму більше ніж на 20–40 %.

5. Усі елементи джерела живлення повинні мати хороші динамічні властивості.

6. У разі зміни довжини дуги в певному діапазоні не повинні виникати значні зміни сили зварювального струму.

7. Коефіцієнт корисної дії повинен бути високим.

Головною характеристикою джерела живлення є його зовнішня характеристика (рис. 5.4) – залежність напруги на виході від сили струму при незмінній напрузі на вході або при постійній частоті обертання вала зварювального генератора.

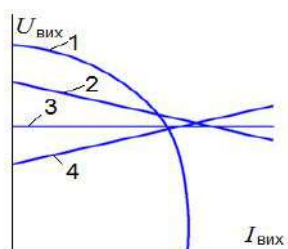


Рисунок 5.4 – Зовнішня характеристика джерела живлення електрозварювальних установок:

1 – що круто падає; 2 – полого; 3 – жорстка, 4 – зростаюча

Вибір зовнішньої характеристики джерела живлення істотно залежить від виду характеристики дуги та умов її саморегулювання.

Характеристика, що круто спадає, найпоширенішою в електрозварювальних установках для ручного зварювання. Це пояснюється тим, що такому зварюванню властива постійна істотна зміна довжини дуги.

За умови збільшення довжини дуги струм зазвичай зменшується, а за умови зменшення – навпаки, збільшується.

Джерела живлення для напівавтоматичних і автоматичних електрозварювальних установок мають зазвичай полого і жорсткі зовнішні характеристики. Це пояснюється тим, що в таких установках довжина дуги та умови її горіння підтримуються автоматично.

Для електрозварювальних установок, де зварювання виконують у середовищі захисних газів (аргону, гелію), використовуються вольфрамові електроди, які не плавляться. До того ж зміна довжини дуги істотно не впливає на зміну сили струму та режим зварювання. Для таких установок використовують джерела живлення, які мають зовнішню характеристику, що круто падає.

Жорсткі та зростаючі зовнішні характеристики мають джерела живлення електроустановок для зварювання електродом, що плавиться, у середовищі аргону або гелію. Приклади таких електрозварювальних установок приведені на рисунку 5.5.



Рисунок 5.5 – Електрозварювальні установки

Вони призначені для виконання таких робіт:

– аргондугового зварювання на постійному струмі електродом, який не плавиться, для всіх видів металів і сплавів, крім алюмінію та його сплавів, а також для ручного дугового зварювання на постійному струмі покритими електродами для виробів із мало- і низьковуглецевої сталі;

Технічні характеристики установок для аргондугового зварювання наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики установок для аргондугового зварювання

Параметри	Типи установок дугового зварювання			
	УДГ – 180	УДГ – 161	УДГУ – 251 AC/DC	УДГУ – 251
$U_m$ , В	220	220	380	380
$f$ , Гц	50	50	50	50
$I_n$ , А (при ТВ, %)	170 (20 %)	150 (35 %)	275 (35 %)	250(35 %)
$\Delta I$ , А	40–70	5–150	3–275	10–250
$U_0$ , В	65	25/44	80/100	80/100
$S$ , кВА	13	8	21	21
$D$ , мм	0,8–4; 2–4	0,8–3; 2–4	0,8–5; 2–5	0,8–5; 2–5
$D \times Ш \times В$ , мм	360×360×940	360×360×940	750×390×770	840×410×680
$M$ , кг	60	60	110	120

У таблиці надано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $\Delta I$  – межі регулювання зварювального струму, А;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times Ш \times В$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг);

– аргондугового зварювання на змінному струмі електродом, який не плавиться, для виробів з алюмінію та його сплавів, а також для ручного дугового зварювання на змінному струмі покритими електродами для виробів з мало- і низьковуглецевої сталі;

– аргонодугового зварювання електродом на змінному та постійному струмі, який не плавиться, а також для ручного зварювання покритими електродами для виробів з усіх видів металів і сплавів.

#### 5.4 Зварювальні трансформатори

Зварювальні трансформатори (рис. 5.6) є одним із поширених джерел живлення для електрозварювальних установок у процесі зварювання на змінному струмі. Це пояснюється простотою їхньої конструкції та надійністю в роботі.

Зварювальним трансформаторам властива крутоспадна зовнішня характеристика. Залежно від способу отримання характеристики та способу регулювання зварювального струму зварювальні трансформатори поділяють на дві групи:

1. Трансформатори з нормальним магнітним розсіюванням і окремим дроселем, обмотка якого підключається послідовно з вторинною обмоткою трансформатора (рис. 5.7).



Рисунок 5.6 – Загальний вигляд зварювальних трансформаторів

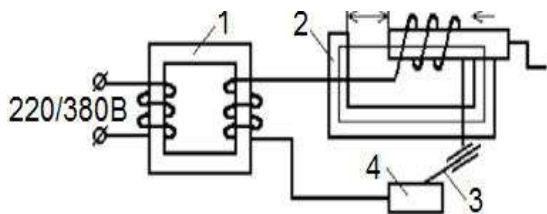


Рисунок 5.7 – Структурна схема електрозварювальної установки з трансформатором і дроселем:  
1 – зварювальний трансформатор,  
2 – дросель; 3 – електрод; 4 – деталь

Трансформатор (1) становить звичайний силовий знижувальний трансформатор із нормальним магнітним розсіюванням. Регулювання зварювального струму відбувається внаслідок змін зазору  $\delta$  між рухомими та нерухомими частинами магнітопроводу дроселя (2).

Мінімальний зварювальний струм спостерігається при  $\delta = 0$ , а максимальне значення – при  $\delta = \delta_{max}$ .

2. Трансформатори з підвищеним магнітним розсіюванням. Залежно від способу отримання підвищеного магнітного розсіювання ці трансформатори класифікуються на такі:

– трансформатори з вбудованим дроселем (рис. 5.8).

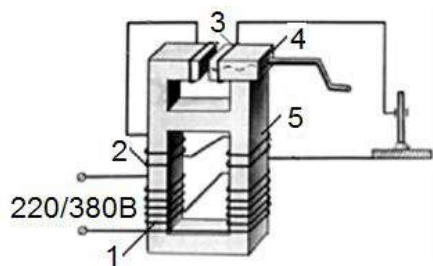


Рисунок 5.8 – Структурна схема електрозварювальної установки з додатковою реактивною обмоткою на загальному магнітопроводі: 1 – первинна обмотка; 2 – вторинна обмотка; 3 – реактивна обмотка; 4 – рухома частина магнітопровода; 5 – магнітопровід

У цій установці дросель і трансформатор вмонтовані в один корпус і мають єдину магнітну систему. Плавне регулювання зварювального струму досягається аналогічно до попередньої конструкції.

– трансформатори з рухомою вторинною обмоткою (рис. 5.9). У таких трансформаторах вторинна обмотка (3) має можливість переміщатися вздовж стрижнів магнітопровода (2), унаслідок чого змінюється індуктивність розсіювання.

У разі зближення первинної та вторинної обмоток індуктивність розсіювання зменшується, а зварювальний струм збільшується, а у разі збільшення відстані між обмотками виникають зворотні явища.

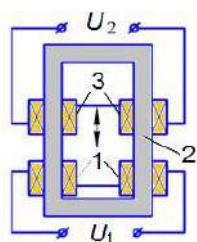


Рисунок 5.9 Структурна схема електрозварювальної установки з вторинною рухомою обмоткою:  
1 – первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – вторинна обмотка

Для розширення діапазону регулювання зварювального струму первинна і вторинна обмотки поділяються на дві секції, які можуть з'єднуватися як послідовно, так і паралельно.

– трансформатори з магнітними шунтами. У таких трансформаторах використовуються шунти двох видів (рис. 5.10, а): без підмагнічування та з підмагнічуванням. Первинна обмотка (1) і вторинна обмотка (4) закріплені нерухомо на магнітопроводі (2). На відміну від попередньої конструкції трансформатора тут передбачений магнітний шунт (3), який може обертатися навколо осі за допомогою механізму, що і призводить до зміни величини повітряного зазору між шунтом і стрижнем магнітопровода. Це зі свого боку забезпечує зміну величин індуктивного опору розсіювання та зварювального струму. За умови зменшення зазору зварювальний струм зменшується.



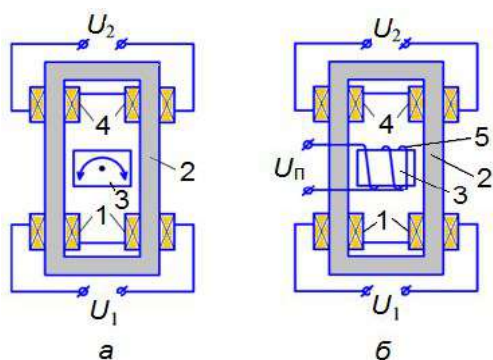


Рисунок 5.10 – Структурні схеми електрозварювальних трансформаторів із шунтами: а) без підмагнічування; б) з підмагнічуванням: 1 – первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – шунт; 4 – вторинна обмотка; 5 – обмотка підмагнічування

У трансформаторах із магнітним шунтом із підмагнічуванням (рис. 5.10, б) на шунті (3) розміщується обмотка (5), яка підключена до регульованого джерела живлення постійним струмом. Коли струм в обмотці намагнічування відсутній, магнітний опір має найменше значення. Шляхом плавного збільшення струму в обмотки підмагнічування досягається плавне зменшення зварювального струму:

– трансформатори зі ступінчастим регулюванням зварювального струму. У таких трансформаторах вторинна обмотка має кілька напайок, які підключені до різного числа витків. За допомогою перемикача відбувається ступінчата зміна кількості витків вторинної обмотки, а отже, вимірюються зварювальні струми та напруги. Підвищене магнітне розсіювання у таких трансформаторах досягається шляхом розміщення первинної та вторинної обмоток на різних стрижнях магнітопроводу.

Прикладом зварювальних установок є зварювальні трансформатори типу ТДМ, зображених на рисунку 5.11.



Рисунок 5.11 – Зварювальні трансформатори для ручного зварювання типу ТДМ

Такі зварювальні трансформатори призначені для ручного дугового зварювання покритими електродами на змінному струмі низьковуглецевих і низьколегованих сталей. Плавне регулювання зварювального струму в широкому діапазоні відбувається в цих трансформаторах за допомогою рухомого шунта. Технічні характеристики деяких зварювальних трансформаторів наведені в таблиці 5.2.



Таблиця 5.2 – Технічні характеристики зварювальних установок

Параметри	Типи установок дугового зварювання			
	ТДМ-140	ТДМ-180	ТДМ-200	ТДМ-250
$U_m$ , В	220	220	220	380
$f$ , Гц	50	50	50	50
$I_n$ , А (при ТВ, %)	140 (10 %)	180 (20 %)	180 (20 %)	250 (10 %)
$\Delta I$ , А	44–140	38–180	60–190	54–170
$U_0$ , В	50	70	59	70
$S$ , кВА	7	13	7	18
$D$ , мм	2–3	2–4	2–4	2–5
$D \times \text{Ш} \times B$ , мм	270×225×415	360×360×940	440×212×302	360×360×940
$M$ , кг	60	60	110	120

У таблиці надано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $\Delta I$  – межі регулювання зварювального струму, А;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times \text{Ш} \times B$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг.

### 5.5 Зварювальні випрямлячі

Зварювальні випрямлячі є джерелами постійного струму для електрозварювальних установок та мають різні конструкції, електричні схеми і призначення.

Зварювальні випрямлячі класифікуються за такими показниками:

- за кількістю фаз: однофазні та трифазні;
  - за можливістю керування: із некерованими (кремнієві та селенові діоди) і керованими (тиристори) вентилями;
  - за видом зовнішньої характеристики: падаюча; полого і жорстка;
- Загалом зварювальні випрямлячі мають головні складники:
- знижувальний трансформатор;
  - випрямний блок, який призначений для перетворення змінного струму в постійний і регулювання (у регульованих) величини напруги;
  - блок пускорегулювання та захисту;
  - систему примусового охолодження.

На практиці використовують трансформатори з дроселем (рис. 5.12) для отримання необхідної зовнішньої характеристики.

Випрямний блок  $VL$  складається з вентилів, які збираються з однофазною (рис. 5.12, а) або трифазною мостовою схемою (рис. 5.12, б). У некерованих випрямлячах використовуються діоди, а у керованих – тиристори.

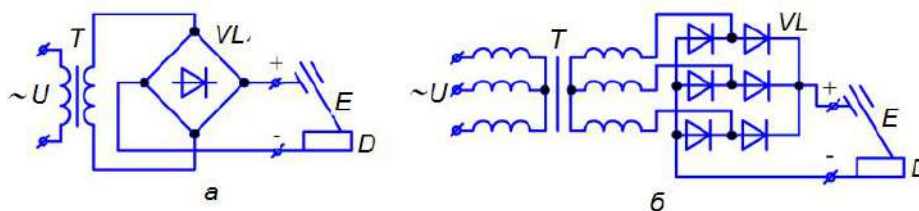


Рисунок 5.12 – Схеми зварювальних випрямлячів :  
а – однофазна мостова; б – трифазна мостова

Режим роботи вентилів залежить від зовнішньої характеристики випрямляча. Наприклад, при падаючій зовнішній характеристиці струми КЗ практично не відрізняються від значень робочого струму, а тому номінальний струм випрямного блоку вибирається таким, що він прирівнюється постійному значенню максимального струму КЗ.

Для випрямлячів із жорсткою зовнішньою характеристикою коливання струмів КЗ можуть майже на порядок перевищувати значення робочого струму. Тому в таких випрямлячах обов'язковим є обмеження струмів КЗ, наприклад, унаслідок використання дроселів насичення або використання швидкодіючих електричних апаратів захисту, характеристики яких є значно кращими, ніж у вентилів.

Прикладом зварювальних однопостових випрямлячів є конструкції типу ВД (рис. 5.12), які призначені для таких видів робіт:

- ручного дугового зварювання покритим електродом на постійному струмі низьковуглецевих, а також корозійностійких сталей;



Рисунок 5.12 – Зварювальні випрямлячі типу ВД

- ручного дугового зварювання покритим електродом, а також для аргонно-дугового зварювання електродом, який не плавиться, на постійному струмі низьковуглецевих, а також корозійностійких сталей.

Технічні дані деяких зварювальних випрямлячів наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики зварювальних випрямлячів однопостового типу

Параметри	Типи установок дугового зварювання			
	ВД-162	ВД-131	ВД-306М1	ВД-306Д
$U_m$ , В	220	220	380	380
$f$ , Гц	50	50	50	50
$I_n$ , А (при ТВ, %)	160 (60 %)	180 (20 %)	150 (80 %)	315 (60 %)
$\Delta I$ , А	20–160	38–180	50–180	40–350
$U_0$ , В		70; 100	80	95
$S$ , кВА	5,3	12, 5	15; 13,5	25
$D$ , мм	2–4	2–4	2–4	2–6
$D \times Ш \times В$ , мм	400×165×290	360×360×940	360×360×940	390×700×600
$M$ , кг	8	60	73	125

У таблиці подано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $\Delta I$  – межі регулювання зварювального струму, А;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times Ш \times В$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг.

Джерелом живлення для випрямляча може бути мережа змінного струму частоту 50 Гц та напругу 220 або 380 В. Підключення/відключення зварювальної установки від джерела живлення відбувається за допомогою контактів перемикача SA1:1 – SA1:4. Для зварювання на змінному струмі підключення зварювального ланцюга відбувається до розмикачів XS3 – XS4, а для зварювання на постійному струмі – до розмикачів XS1 – XS2.

Принципова схема зварювального випрямляча зображена на рисунку 5.13.

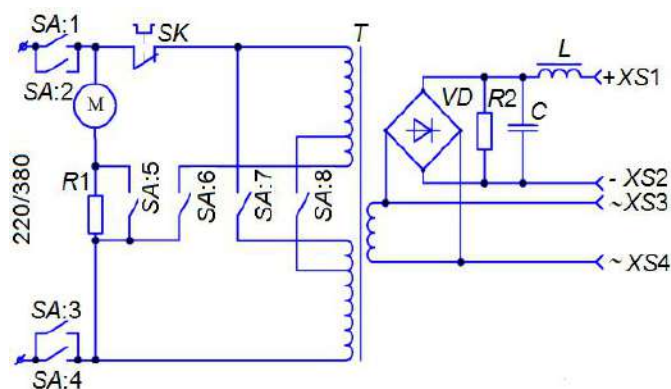


Рисунок 5.13 – Принципова схема зварювального випрямляча

Для захисту від тривалих перевантажень по струму в схемі передбачено термореле *SK*. Перелік елементів схеми показаний у таблиці 5.4.

Багатопостові зварювальні випрямлячі призначені для комплектації одночасно декількох зварювальних постів. Прикладом таких електрозварювальних установок можуть бути зварювальні випрямлячі типу ВДМ (рис. 5.14), які призначені для комплектації зварювальних постів ручного дугового зварювання покритими електродами виробів з легованих сталей.

Такі випрямлячі мають жорстку вихідну характеристику та є регульованими. Технічні характеристики зварювальних випрямлячів наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.4 – Перелік елементів схеми рисунка 5.13

Позначення	Найменування, тип
<i>C</i>	Конденсатор МБГЧ–1-500 В–1,0 мкФ
<i>M</i>	Електровентилятор 220–230 В; 50–60 Гц
<i>R1</i>	Резистор С5 – 35В – 25 Вт – 1,2 кОм
<i>R2</i>	Резистор С2 – 23 – 2 – 5,6 кОм
<i>SA</i>	Перемикач <i>LK 32R/43AP</i>
<i>SK</i>	Термореле 60Т11Ех – 15 L120 – 50С
<i>XS1 – XS4</i>	Гніздо панельне ВЕВ1025
<i>VD</i>	Блок випрямний ВД – 131



Рисунок 5.14 – Багатопостові зварювальні випрямлячі типу ВДМ

Таблиця 5.5 – Технічні характеристики багатопостових зварювальних випрямлячів

Параметри	Типи установок дугового зварювання		
	ВДМ – 6303С	ВДМ –1202С	ВДМ-1600С
$U_m$ , В	380	380	380
$f$ , Гц	50	50	50
$I_n$ , А (при ТВ, %)	630 (100 %)	1 250 (100 %)	1 600 (100 %)
$N$ , шт	4	8	10
$K_o$	0,5	0,5	0,5
$I_n$ пос.	315 (60 %)	315 (60 %)	315 (60 %)
$U_p$ , В	60	63	60
$U_0$ , В	75	75	73
$S$ , кВА	46	96	120
$D$ , мм	3-6	3-6	3-6
$D \times Ш \times В$ , мм	595×720×630	600×1130×800	1050×717×789
$M$ , кг	205	350	420

У таблиці подано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $N$  – кількість одночасно працюючих постів, шт;  $K_o$  – коефіцієнт одночасної роботи;  $I_n$  пос. – номінальний зварювальний струм одного поста, А;  $U_p$  – номінальна робоча напруга, В;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times Ш \times В$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг.

Для забезпечення можливості незалежного регулювання зварювального струму на окремому посту використовуються баластні реостати типу РБ-302 (рис. 5.15).

За допомогою баластного реостата також досягається необхідна крутизна зовнішньої характеристики на зварювальному посту. Технічні характеристики баластного реостата наведено в таблиці 5.6.



Рисунок 5.15 – Реостат баластний типу РБ

Таблиця 5.6 – Технічні характеристики баластного реостата типу РБ

Найменування параметрів	Значення
Номінальний струм, А	315
Опор, Ом	
– найменший	0,09
– найбільший	55
Діапазон регулювання зварювального струму, А	6–315
Маса, кг	26
Габаритні розміри, мм	605×370×500

## 5.6 Зварювальні генератори постійного струму

Зварювальні генератори постійного струму становлять собою електричну машину постійного струму, в якій відбуваються перетворення механічної енергії, що підводиться від приводного двигуна в електричну енергію на невеликій напрузі.

Зварювальні генератори класифікуються:

- за видом приводного двигуна: зварювальні перетворювачі, приводним двигуном яких є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором; зварювальні агрегати, у яких приводним двигуном є двигун внутрішнього згоряння (бензиновий або дизельний);
- за видом зовнішньої характеристики: із крутопадаючою, пологою, жорсткою, універсальною;
- за кількістю постів: одно- та багатопостові;
- залежно від способу збудження: із незалежним збудженням і послідовною обмоткою розмагнічування (підмагнічування); із паралельним збудженням і послідовною обмоткою розмагнічування; із розімкнутими полюсами; з поперечним полем.

У генераторів незалежного збудження та послідовною обмоткою розмагнічування (підмагнічування) обмотка збудження  $LG2$  (рис. 5.16) живиться від незалежного джерела живлення з напругою  $U_z$ , функції якого в деяких електрозварювальних установках виконують тиристорні випрямлячі.

Величина магнітного потоку  $\Phi_n$  обмотки незалежного збудження регулюється за допомогою реостата  $R$ . Обмотка  $LG1$  підключена послідовно до зварювального ланцюга, тому величина магнітного потоку  $\Phi_p$ , який вона створює, пропорційно залежить від сили зварювального струму.

Якщо обмотки  $LG1$  і  $LG2$  підключені так, що їхні магнітні потоки  $\Phi_p$  і  $\Phi_n$  збігаються, то обмотка  $LG1$  буде підмагнічувальною й у разі зміни зварювального струму напруга  $U_d$  на виході генератора буде залишатися незмінною, тобто характеристика буде «жорсткою».



Якщо обмотки  $LG1$  і  $LG2$  підключені так, що їхні магнітні потоки  $\Phi_p$  і  $\Phi_n$  спрямовані назустріч один одному, то обмотка  $LG1$  буде розмагнічувальною. Вихідна характеристика такого генератора буде падаючої або крутопадаючою, а у разі збільшення зварювального струму напруга  $U_d$  на виході генератора буде зменшуватися.

Рисунок 5.16 –  
Схема зварювального генератора незалежного збудження з послідовною обмоткою розмагнічування (підмагнічування)

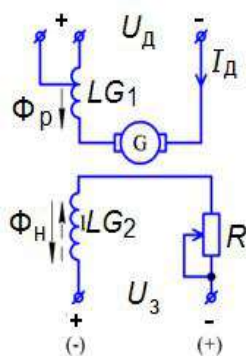
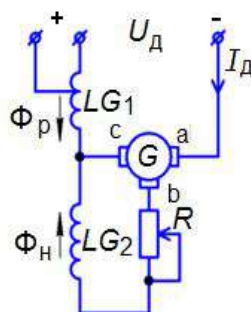


Рисунок 5.17 –  
Схема зварювального генератора паралельного збудження з послідовною обмоткою розмагнічування



Різний нахил зовнішньої характеристики, а відповідно, і зміна струму КЗ досягаються шляхом секціонування обмотки  $LG1$ .

У зварювального генератора паралельного збудження з послідовною обмоткою розмагнічування (рис. 5.17) магнітні потоки основної обмотки  $LG2$  ( $\Phi_n$ ) і обмотки  $LG1$  ( $\Phi_p$ ) спрямовані назустріч один одному.

Обмотка паралельного збудження  $LG2$  підключена лише наполовину витків обмотки якоря через наявність щітки «b». Величина магнітного потоку  $\Phi_n$ , який створює ця обмотка, не залежить від величини зварювального струму, оскільки магнітний потік (намагнічувальний) реакції якоря, який діє в цій половині полюса, компенсує розмагнічувальну дію послідовної обмотки  $LG1$ . Такі генератори мають вихідні характеристики, що спадають.

Прикладом зварювального генератора є зварювальний перетворювач типу ПСО-500 (рис. 5.18). В одному корпусі перетворювача розташовується приводний трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором і зварювальний генератор. На загальному валу містяться якір генератора, ротор асинхронного двигуна та вентилятор.

Технічні характеристики деяких зварювальних перетворювачів наведені в таблиці 5.7.



Рисунок 5.18 – Зварювальні перетворювачі

Таблиця 5.6 – Технічні характеристики зварювального перетворювача

Параметри	Тип перетворювача					
	ПСО-120	ПСО-300А	ПСО-500	ПСО-800	АСО-2000	ПС-1000
Тип генератора	ГСО-120	ГСО-300А	ГСО-500	ГСО-800	СГ-1-000	ГС-1-000
Номінальний зварювальний струм, А	120	300	500	800	1-000	1-000
Напруга неробочого ходу, В	48–60	55–80	58–86	60–90	–	–
Межі регулювання зварювального струму, А	30–120	75–300	25–600	200–800	300–1 200	300–1 200
Потужність перетворювача, кВт	7,3	12,5	28	55	56	55
Швидкість обертання якоря, об/хв.	2 900	2 890	2 930	–	1 460	1 460
КПД перетворювача, %	55	60	59	57	59	60
Габаритні розміри, мм						
– довжина	1 055	1 015	1 052	1 275	4 000	1 465
– ширина	550	708	770	–	93,5	770
– висота	730	980	1 080	–	1 190	910
Маса, кг	155	400	540	1 040	1 400	1 600

Прикладом зварювального агрегату є пристрій типу АДД (рис. 5.19), який призначений для живлення одного зварювального поста для ручного дугового зварювання на постійному струмі.

Такі електрозварювальні установки використовуються для зварювання в польових умовах, де живлення від мережі неможливо чи є складності. Тому ці установки виконуються мобільними.



Рисунок 5.19 – Електрозварювальні агрегати

Приводним двигуном у таких установках є дизельний двигун типу Д-144 із повітряним охолодженням або типу Д-242 із водяним охолодженням. Джерелом зварювального струму в таких агрегатах є зварювальний генератор типу ГД. Агрегати виконують зварювання електродами з діаметром від 1,6 до 6 мм із будь-яким типом покриття. Діапазон регулювання зварювального струму становить 60–430 А.

## 5.7 Контактні електрозварювальні установки

Незважаючи на велику різноманітність електрозварювальних установок для контактного зварювання, принцип їхньої дії полягає в тому, що ділянки деталей, які зварюються, приводять до контактування один з одним, нагріваючи їх до пластичного або розплавленого стану струмом, який проходить, безпосередньо, через місце зварювання. Після відключення електричного струму та подальшого механічного натискання деталей відбувається охолодження місць зварювання і створення нероз'ємного з'єднання між деталями.

До головних видів контактного зварювання належать: точкове, рельєфне, роликове і стикове (рис. 5.20).

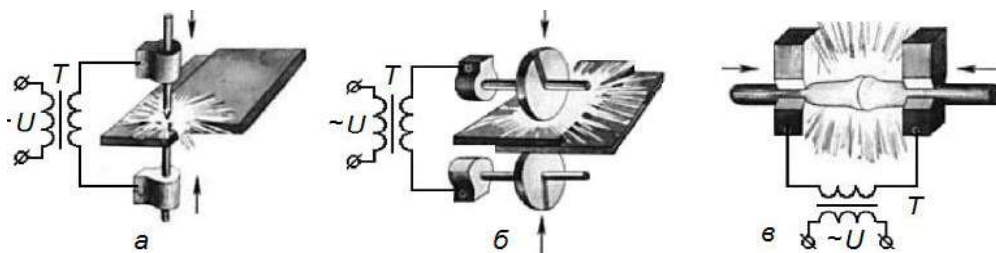


Рисунок 5.20 – Види контактного зварювання:

*a* – точкове; *б* – роликове; *в* – нажимне

Під час точкового зварювання (рис. 5.20, *a*) деталі для зварювання розміщують між електродами, які закріплюються в електротримачах.

За допомогою натискного механізму електроди з певним зусиллям стискають деталі. Через електроди та деталі, що зварюються, пропускають струм, який нагріває деталі до температури плавлення або пластичного стану на невеликих контактних ділянках. Після відключення струму відбувається охолодження контактних ділянок і створення нероз'ємного точкового шва.

Такий вид зварювання використовують для зварювання деталей завтовшки до 6 мм. Залежно від кількості точок, в яких одночасно відбувається зварювання, розрізняють одне-, двох- і багатоточкове зварювання.

*Рельєфне зварювання* є одним з видів точкового зварювання, при якому одна з деталей має виступи, через які відбувається початкове контактування з іншою деталлю, а потім у процесі зварювання ці виступи плавляться та забезпечують створення точкового зварювального шва.

Під час *роликового (шовного) зварювання* (рис. 5.20, *б*) деталі розташовують між роликами, які за допомогою натискного механізму стискають їх із необхідним зусиллям. У процесі зварювання відбувається переміщення деталей і проходження через ролики та деталі струму, що нагріває деталі до температури плавлення або пластичного стану. Після охолодження створюється зварювальний шов. Залежно від виду шва поділяють безперервне та перервне шовне зва-

рювання. Такий спосіб зварювання використовують для зварювання матеріалу завтовшки 1,5–02 мм.

Під час *стикового зварювання* (рис. 5.20, в) можливі два їхні види: зварювання опором і зварювання оплавленням.

Під час *стикового зварювання опором* стики деталей спочатку дуже стискаються, а потім пропускається струм через деталі в місці їх контактування. Під час проходження струму через деталі внаслідок великого опору в місці контактування відбувається інтенсивне нагрівання торців і поява тонкого розплавленого шару матеріалу деталей.

Під час *стикового зварювання оплавленням* спочатку подається напруга на обидві деталі. Потім відбувається їх поступове зближення до положення контактування торців цих деталей без докладання значних механічних зусиль. За умови достатнього нагрівання матеріалу деталей по довжині стику деталі стискаються з великим зусиллям, що сприяє витісненню розплавленого металу, а добре прогрітий метал пластично деформується та зварюється. Таке зварювання використовується для зварювання у стик листів, труб, замкнутих профілів та інших деталей.

Головним елементом електрозварювальної установки (рис. 5.21) для контактного зварювання є зварювальний трансформатор і пусковий пристрій (далі ПП).



Рисунок 5.21 – Установки для контактного зварювання деталей (а) та трансформатори (б)

Зварювальні трансформатори класифікуються за такими ознаками:

– за виконанням первинних обмоток (із циліндричними та дисковими котушками);

- за виконанням вторинних обмоток (із гнучким рухомим вторинним витком і з жорстким нерухомим вторинним витком);
- за взаємним розміщенням первинних і вторинних обмоток (із симетричним і несиметричним розміщенням обмоток);
- за розміщенням первинних обмоток на стрижнях магнітопроводу (на одній і на двох стрижнях);
- за виконанням магнітопроводу (стрижневі, броньові, кільцеві).

Конструкція первинних обмоток трансформаторів установок для контактного зварювання аналогічна до тої, що мають трансформатори установок для дугового зварювання. Вторинні обмотки трансформаторів мають конструктивні особливості та є різноманітними (із мідних пластин, трубчасті з міді тощо) залежно від технологічних можливостей та енергетичних показників машини.

Використання пускового пристрою (рис. 5.22) обумовлено тим, що електричне контактне зварювання відбувається імпульсним струмом, час проходження якого зазвичай триває від сотих секунд до декількох секунд. Якість зварювання значною мірою залежить як від сили струму, так і від тривалості його перебігу. Недотримання співвідношення цих параметрів може призвести до непроварювання або прожигання матеріалу.

Тому операція включення/відключення струму виконується за допомогою пускового пристрою, до складу якого входить контактор і керований програмний регулятор часу.



Рисунок 5.22 – Пускові пристрої для установок контактного зварювання

У сучасних конструкціях установок для зварювання зазвичай використовують тиристорні контактори (рис. 5.23), які, порівняно з електромагнітними, мають низку істотних переваг: високу надійність, велику частоту включення, меншу потужність власних втрат, менші габарити та масу.



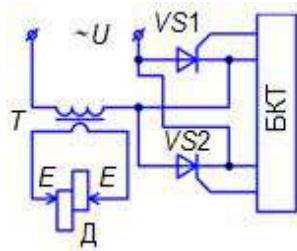


Рисунок 5.23 –  
Схема  
тиристорного  
контактора

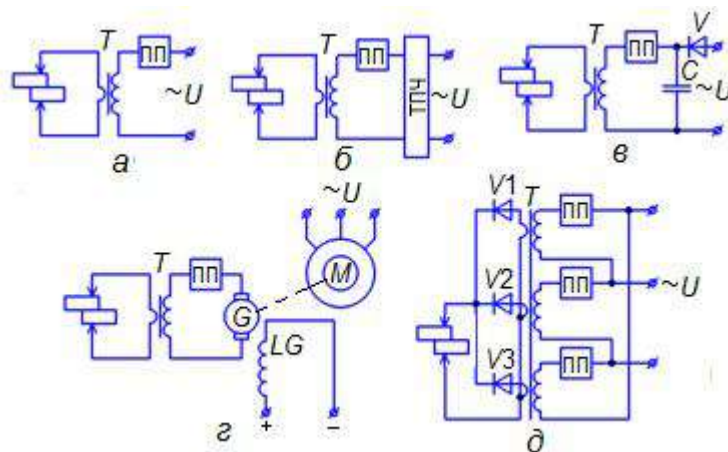


Рисунок 5.24 – Електричні схеми зварювальних  
установок для контактного зварювання

Типовими електричними схемами електрозварювальних установок для контактного зварювання є такі:

- схеми на змінному струмі промислової частоти (рис. 5.24, а). Їхня перевага – простота;
- схеми для контактного зварювання на змінному струмі зниженої частоти (рис. 5.24, б). У таких схемах використовуються зазвичай тиристорні перетворювачі частоти, які знижують частоту змінного струму до 5–15 Гц. Їхньою перевагою є зменшення питомих втрат електроенергії;
- конденсаторна електрична схема (рис. 5.24, в), в якій імпульс зварювального струму створюється за допомогою енергії, яка накопичується в конденсаторі;
- для зварювання на постійному струмі (рис. 5.24, г). Згідно з цією схемою механічна енергія на вал зварювального генератора  $G$  із незалежним збудженням передається від трифазного асинхронного двигуна  $M$  із короткозамкненим ротором. За допомогою перетворювального пристрою імпульс постійного струму подається на первинну обмотку зварювального трансформатора  $T$ ;
- електрична схема з випрямлячем струму у вторинному контурі (рис. 5.24, д). Така схема забезпечує створення імпульсу однієї полярності практично необмеженої тривалості. Для випрямлення струму можуть використовуватися як керовані, так і некеровані вентиля.

Прикладом електрозварювальних установок для контактного зварювання є машина типу МТ-501 (рис. 5.25), яка призначена для точкового зварювання на змінному струмі виробів з низьковуглецевих і нелегованих сталей. У таких машинах використовується ножний привід за допомогою якого відбувається стискання деталей між електродами. Технічні характеристики таких машин показані в таблиці 5.7.



Таблиця 5.7 – Технічні характеристики машини для точкового зварювання типу МТ-501

Найменування параметрів	Значення
Напруга мережі живлення, В	$2 \times 380$
Частота мережі живлення, Гц	50
Кількість ступенів регулювання	2
Найбільший вторинний струм, кА	5
Номінальний робочий струм ( ПВ = 15 %)	2,5
Межі регулювання тривалості зварювального струму, с	0,1–3
Найбільше зусилля стискання деталей, кГс	125
Максимальна споживана потужність, кВА	38



Рисунок 5.25 – Машина для кон-тактного точкового зварювання типу МТ-501

Машина рельєфного контактного зварювання типу МР-8010 (рис. 5.26) призначена для зварювання змінним струмом деталей із низьковуглецевої сталі, наприклад арматури залізобетонних виробів та інших.

Технічні характеристики машини наведені в таблиці 5.8.

Прикладом зварювальної машини для роликового (шовного) зварювання є установка для зварювання змінним струмом виробів із гальванічним покриттям (рис. 5.27), таких як оцинкованих сталей і сталей без покриття. Конструктивною особливістю машини є наявність приводу на два ролика, які мають кут нахилу 60°.

Таблиця 5.8 – Технічні характеристики машини рельєфного контактного зварювання типу МР-8010

Найменування параметрів	Значення
Напруга мережі живлення, В	380
Рід зварювального струму	змінний
Найбільша потужність при КЗ, кВА	780
Потужність при ПВ = 50 %, кВА	250
Найбільший вторинний струм, кА	80
Зусилля стискання, кГс	200-3010
Габарити (Д × Ш × В) мм	1 660×610×2 500
Маса, кг	1 300
Частота мережі живлення, Гц	50



Рисунок 5.26 – Машина рельєфного контактного зварювання типу МР-8010

Такі машини можуть виконувати зварювання бортів, днищ у баках прямокутної форми тощо. Технічні характеристики таких машин наведені в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Технічні характеристики машини шовного зварювання типу МШ-3210

Найменування параметрів	Значення
Напруга мережі живлення, В	380
Потужність при ПВ = 50 %, кВА	192
Найбільший вторинний струм, кА	32
Номінальний тривалий вторинний струм, кА	22
Лінійна швидкість роликів електродів, мм/хв	0,5-2,5
Діаметр електродів	220/280
Габарити (Д × Ш × В) мм	2 275×650×2 030
Маса, кг	1 720
Частота мережі живлення, Гц	50



Рисунок 5.27 – Машина шовного зварювання типу МШ-3210

Прикладом електрозварювальної установки для контактного стикового зварювання безперервним оплавленням є машина типу К-823 (рис. 5.28). Процес зварювання відбувається автоматично згідно з установленою програмою. Такі машини призначені для роботи в польових та стаціонарних умовах. Технічні характеристики машин наведені в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Технічні характеристики машини стикового зварювання

Найменування параметрів	Значення
Напруга мережі живлення, В	380
Найбільший вторинний струм, кА	50
Номінальний тривалий вторинний струм, кА	9
Потужність при ПВ = 50 %, кВА	110
Опір КЗ, мкОм	100
Робочий тиск у гідросистемі, МПа	10
Маса, кг	2 700
Габарити (Д×Ш×В) мм	1622×880×930



Рисунок 5.28 – Контактна машина для стикового зварювання типу

## 5.8 Електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання

Для деталей великої товщини, а також кольорових металів і сплавів, неіржавих сталей використовуються спеціальні зварювальні установки.

Головними з них є такі:

1. Електрозварювальні установки для електрошлакового зварювання (рис. 5.29).

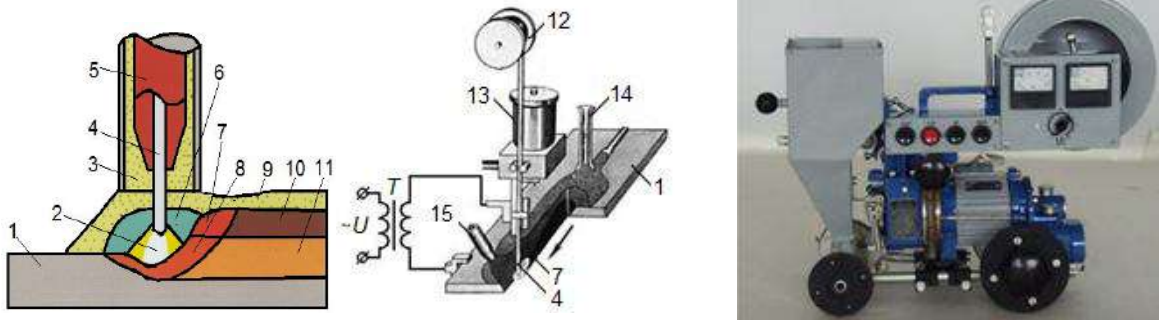


Рисунок 5.29 – Електрозварювальні установки для електрошлакового зварювання: 1 – матеріали, що з'єднуються, 2 – електрична дуга; 3 – флюс; 4 – електрод; 5 – контактний наконечник; 6 – захисна атмосфера; 7 – розплавлений шлак; 8 – зварочна ванна; 9 – флюс; 10 – шлак, що застиг; 11 – метал, що зварився; 12 – бухта подачі дроту; 13 – привод; 14 – сопло для видалення шлаку; 15 – сопло для подачі флюсу

Під час зварювання на таких установках електрод (4) розміщується між торцями деталей (1), що зварюються, які покриваються товстим шаром флюсу (3). У процесі горіння електричної дуги (2) відбувається плавлення флюсу і створення шлакової ванни (7). Температура шлакової ванни є достатньою для плавлення торців деталей (1) і електроду (4) у вигляді дроту, який автоматично подається в зону горіння дуги з бухти (12) за допомогою приводу (13). Джерелом живлення для таких електрозварювальних установок є зварювальні трансформатори з жорсткою зовнішньою характеристикою та глибоким регулюванням напруги як однофазні, так і трифазні з вторинною напругою у 38–63 В і номінальним зварювальним струмом до 3 000 А.

Зварювальні установки дають змогу зварювати метали практично необмеженої товщини без скошування кромek за один прохід електроду;

2. Електрозварювальні установки для височастотного зварювання.

Такі установки залежно від способу отримання високої температури можуть бути двох видів.

В установках першого виду зварні деталі з'єднуються за допомогою торців, і місця їх контактування внаслідок індукційного нагрівання від індукто-

ра нагріваються до температури плавлення. Джерелом живлення для індуктора є машинні або тиристорні перетворювачі з частотою у 1–70 кГц. Такі установки (рис. 5.30) використовуються для зварювання труб із чорних і кольорових металів. Їхнім головним недоліком є те, що значна частина енергії виділяється поза зони розплавлення торців зварених деталей.



Рисунок 5.30 – Установки для зварювання труб

В установках *другого виду* торці зварюваних деталей розміщуються в безпосередній близькості один від іншого. До зварюваних деталей підводиться напруга від високочастотного джерела живлення унаслідок проходження струму відбувається оплавлення торців, а потім під час їх з'єднання – зварювання. Джерелом живлення в таких установках є високочастотні генератори, які працюють на радіочастотах. Ці установки призначені для зварювання труб з листового заліза, електричних кабелів тощо;

### 3. Електрозварювальні установки для плазмового зварювання/різання.

У таких установках (рис. 5.31) використовуються плазмотрони з дугою прямої та не прямої дії. Під час такого зварювання використовується теплова енергія стовпа дуги, що горить між двома електродами плазмотрона або між внутрішнім електродом плазмотрона та матеріалом зварюваних деталей. У таких установках використовуються джерела живлення з круто падаючими вертикальними зовнішніми характеристиками, потужність яких становить від 5 кВА до 160 кВА. Плазмове зварювання використовують для зварювання тугоплавких металів і сплавів, під час зварювання металів із неметалами, для наплавлення та нанесення покриття, різання металів тощо.

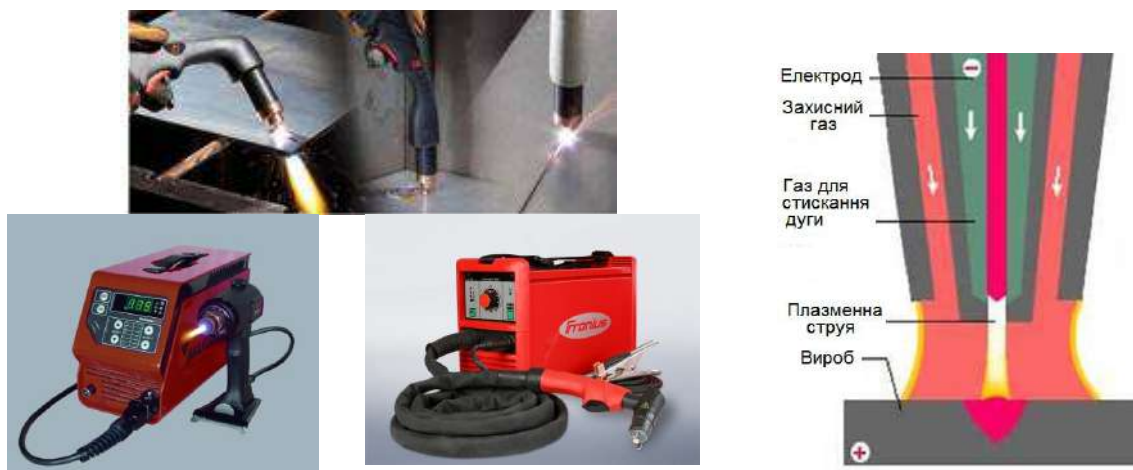


Рисунок 5.31 – Плазмові зварювальні установки

#### 4. Електрозварювальні установки для лазерного зварювання/різання.

Такі установки (рис. 5.32) призначені для зварювання та різання металів і неметалів великої товщини (до десятків міліметрів). У цих установках процес зварювання може відбуватися на повітрі, у вакуумі та середовищі захисних газів;



Рисунок 5.32 – Електролазерні зварювальні установки

#### 5. Електрозварювальні установки для електроннопроміневого зварювання.

Головним складником таких установок є електронна пушка, яка залежно від напруги може бути від 30 кВ до 100 кВ і вище. Потужність таких установок становить від 5 кВА до 160 кВА.



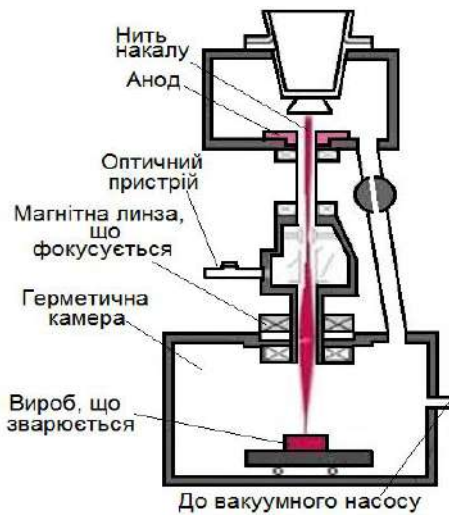


Рисунок 5.33 – Установа для електронно-проміневого зварювання

Таким чином, електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання технічних металевих і неметалевих конструкцій широко використовуються у сучасному світі. Завдяки використанню таких установок є можливість з'єднання елементів у будь яких середовищах.

### 5.9 Електрозварювальні установки як приймачі електричної енергії

Режим роботи більшості електрозварювальних установок повторно-короткочасний і лише для деяких – тривалий.

Діапазон потужностей електрозварювальних установок дуже широкий і становить від одиниць до десятків тисяч кіловольтампер. Нижче наводяться дані про потужність деяких видів установок, кВА:

– зварювальні трансформатори	5–170;
– зварювальні генератори	4–55;
– зварювальні випрямлячі	5–155;
– машини для точкового зварювання	10–200;
– машини для рельєфного зварювання	100–1 300;
– машини для роликового зварювання	50–1 100;
– конденсаторні машини	20–70;
– автоматичні зварювальні лінії	600–20 000.

Зазвичай електрозварювальні установки становлять однофазні приймачі електричної енергії, які підключаються до лінії на фазну напругу 220 В або на лінійну напругу 380 В. Тому вони визначають несиметрію струмів і напруг.

Більшості установок властиві низькі значення коефіцієнта потужності  $\cos\phi$ .

В установках для дугового зварювання величина  $\cos\varphi$  істотно залежить від виду джерела живлення зварювальної дуги і складається з такого:

- зварювальних трансформаторів 0,3–0,5;
- зварювальних випрямлячів 0,5–0,9;
- зварювальних генераторів 0,7–0,9.

Установки для контактного зварювання мають такі значення  $\cos\varphi$ .

#### Одноточкові

- стаціонарні універсальні 0,25–0,35;
- стаціонарні 0,55–0,7;
- підвісні 0,65–0,9;
- шовні 0,4–0,6.

#### Многоточкові стикові

- зварювання опором 0,6–0,9;
- зварювання оплавленням 0,8–0,9.

Для підвищення коефіцієнта потужності сучасні зразки електрозварювальних установок мають індивідуальні компенсувальні пристрої.

Робота електрозварювальних установок супроводжується провалами напруги, обумовленим імпульсним спрямуванням їхнього навантаження. Особливо цей недолік властивий контактним точковим і стиковим машинам.

Зварювальні випрямлячі є генераторами високих гармонік. Для усунення цього недоліку в установках використовують фільтри вищих гармонік.

Електрозварювальні установки створюють перешкоди випромінювання в області частот 750 кГц, 3 і 30 МГц. Для захисту їх використовують екранування установок, заземлення екранів і корпусу установки.

Робота установок супроводжується стрибками напруги, які можуть досягати дворазових значень від максимального робочого, а тривалість перехідних процесів досягає 3–6 періодів.

### Контрольні питання

1. Як класифікуються електрозварювальні установки?
2. У чому полягає принцип дії дугових електрозварювальних установок?
3. Як класифікуються зварювальні дуги та їхні характеристики?
4. Які джерела зварювальної дуги Ви знаєте?
5. Проаналізуйте головні види зовнішніх характеристик джерел живлення зварювальної дуги.
6. Які режими дугового зварювання Ви знаєте?

7. Охарактеризуйте зварювальні трансформатори як джерела зварювальної дуги (класифікація, головні елементи, схеми включення).
8. Дайте характеристику зварювальним випрямлячам як джерел зварювальної дуги (класифікація, головні елементи, схеми включення).
9. Дайте характеристику зварювальних генераторів постійного струму як джерел зварювальної дуги (класифікація, головні елементи, схеми включення).
10. Наведіть приклади типових зразків зварювальних трансформаторів для ручного зварювання, їхнє призначення та головні характеристики.
11. Наведіть приклади типових зразків зварювальних випрямлячів, їх призначення та головні характеристики.
12. Наведіть приклади типових зразків електрозварювальних установок для аргонодугового зварювання, їхнє призначення та головні характеристики.
13. Наведіть приклади типових зразків зварювальних генераторів постійного струму, їхнє призначення та головні характеристики.
14. Як класифікуються контактні електрозварювальні установки?
15. Назвіть основне електрообладнання електрозварювальних установок для контактного зварювання.
16. Які типові електричні схеми електрозварювальних установок для контактного зварювання Ви знаєте?
17. Наведіть приклади типових зразків зварювальних установок для контактного точкового та рельєфного зварювання, їхнє призначення та головні характеристики.

## 6 ЕЛЕКТРОЛІЗНІ УСТАНОВКИ

- 6.1 Електролізні установки для отримання чистих металів та газів.
- 6.2 Електролізні установки з розплавлених сполук солей і газів.
- 6.3 Джерела живлення електролізних установок.
- 6.4 Електролізні установки гальванотехніки.
- 6.5 Джерела живлення для електролізних установок гальванотехніки.
- 6.6 Електролізні установки як приймачі електричної енергії.

В основі принципу дії електролізних установок є явище *електролізу*.

*Електроліз* – це сукупність окісно-відновних процесів, що перебігають під час проходження постійного струму через розчин або розплав електроліту з зануреними у нього електродами.

*Електроліти* – це речовини, розчини та розплави, які можуть проводити електричний струм, носіями якого є іони, які утворюються внаслідок електролітичної дисоціації (процес розпаду речовин на рівномірно заряджені іони).

Уперше явище електролізу було відкрито в 1800 р. англійськими вченими У. Нікольсеном та А. Карлайлем під час спостереження виділення бульбашок кисню на катоді у процесі занурення електродів у воду (рис. 6.1).



Рисунок 6.1 – Відкриття явища електролізу

Закони електролізу вперше були експериментально встановлені англійським фізиком М. Фарадеєм у 1833 р.

На сьогодні широко використовується явище електролізу в промисловості, а саме для такого:

- отримання лужних (Li-літій, K-калій, Na-натрій) та лужноземельних (Ca-кальцій, Ba-барій, Sr-стронцій) металів і алюмінію (Al);
- отримання галогенів (F-фтор, Cl-хлор, I-йод, Br-бром) та водню (H) і тощо;
- нанесення металевого покриття на поверхню виробів (*гальваностегія* – нікелювання, хромування, золочення);
- виготовлення рельєфних металевих копій (*гальванопластика*);
- очищення кольорових металів від домішок (*рафінування*).

Відповідно до сфери використання електролізні установки класифікуються на установки:

- для отримання чистих металів та газів;
- гальванотехнічні установки.

Коротко розглянемо деякі електролізні установки отримання металів та принцип їхньої дії.

### 6.1 Електролізні установки для отримання чистих металів та газів

В електролізних установках для отримання чистих металів із водних розчинів отримують такі метали, як: нікель, срібло, цинк, золото, хром, мідь тощо, які мають електродний потенціал «– 1».

Як приклад розглянемо отримання цинку електролізним способом.

Електроліз цинку з водних розчинів його солей виконують у прямокутних ваннах (*електролізерах*), корпус яких виконується з дерева або залізобетону (рис. 6.1). У середині ванна покривається листами з вініпласту або свинцю, а зовні кислотостійкої фарбою, бітумом або гумою. Для електроізоляції ванн від землі їх установлюють на ізолятори 7.

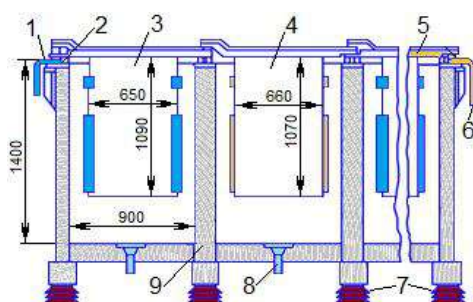


Рисунок 6.1 – Конструкція електролізера для електролізу цинку: 1 – катод; 2 – катодна шина; 3 – катодна ванна; 4 – анодна ванна; 5 – анодна шина; 6 – анодний струмопровід; 7 – ізолятори; 8 – зливний патрубок; 9 – корпус ванни

У ваннах закріплюються алюмінієві катоди та свинцеві аноди прямокутної форми. Аноди розміщують між катодами на відстані 30-40 мм

Внутрішній об'єм ванни заповнюється (5–6) % водним розчином  $ZnSO_4$ .

Напруга на ванні в процесі роботи дорівнює 3,5–4,5 В. Ванни розміщуються поруч і об'єднуються у блоки. Напруга на блоках може коливатися до 300–400 В. Ванни у блоці з'єднуються послідовно, сила струму становить 7–12 кА, а щільність струму 400–600 А/м<sup>2</sup>.

У процесі електролізу на катоді осідає цинк, який після закінчення процесу (40–50 год.) знімається з катода і відправляється на переплавлення.

## 6.2 Електролізні установки з розплавлених сполук солей і газів

В установках для електролізу розплавлених сполук солей металів отримують метали, такі як алюміній, кальцій, натрій, магній, берилій, фтор тощо. Усі ці речовини мають нормальний потенціал нижче ніж «-1».

Розглянемо роботу таких установок на прикладі отримання алюмінію.

Алюміній є найпоширенішим матеріалом, який в природі в чистому вигляді практично не зустрічається. Тому його отримують за допомогою електролізу з алюмінієвих руд.

Процес отримання алюмінію складається з декількох стадій:

- отримання з руди глинозему (окис алюмінію  $Al_2O_3$ );
- виробництво фтористих солей (фтористого алюмінію, фтористого натрію);
- виробництво вугільної анодної маси, загартованих анодних і катодних блоків, а також інших футерувальних матеріалів;
- електролітичне виробництво алюмінію.

Схема електролізера для електролізу алюмінію наведена на рисунку 6.2.

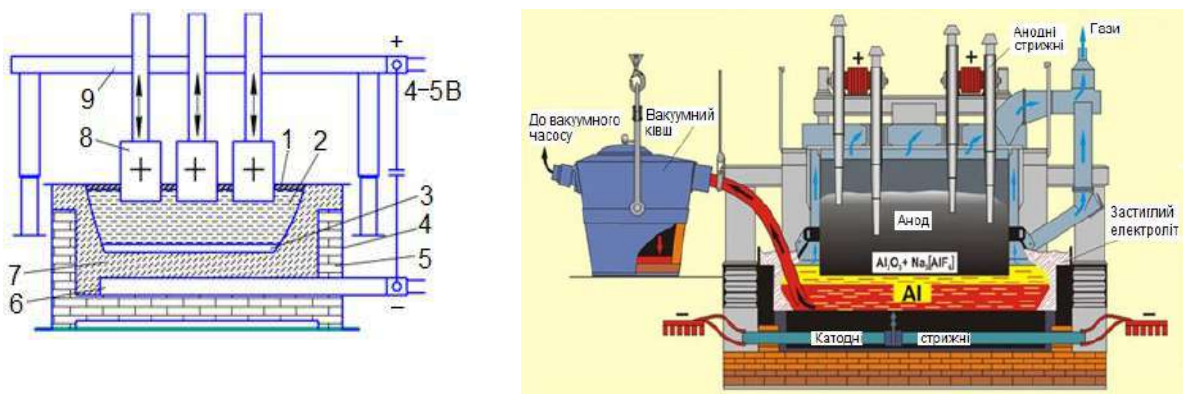


Рисунок 6.2 – Схема електролізера для електролізу алюмінію:

- 1 – глинозем; 2 – кріоліто-глиноземний розплав; 3 – розплавлений алюміній;  
4 – ванна; 5 - шамотна кладка; 6 – шина, що підводить струм;  
7 – вугільні подові блоки; 8 – аноди; 9 – анодні шини

До складу електролізера входить ванна (4), яка виготовляється з металевих листів і має прямокутну форму. Усередині ванна футерована вугільними блоками, а знизу розміщується подина з вугільними блоками, до якої підводиться спеціальна шина (6), через яку підводиться струм. Бічні стіни ванни покривають азбестовими листами, та теплоізолюють глиноземом. Аноди (8) підвішують на рухомій рамі.



Процес електролізу полягає у виділенні на катоді металевого алюмінію та окислення вугільного анода, на якому виділяється кисень.

Функції катода виконує шар розплавленого алюмінію (3), який за допомогою більшої питомої маси осідає на дно ванни. Над шаром алюмінію розміщується шар розплавленого електроліту. Процес електролізу також супроводжується виділенням оксиду вуглецю. Електричне з'єднання ванн між собою та струмопроводом від джерела живлення здійснюється за допомогою шин, в яких сила струму може становити 150 кА.

У нормальному режимі роботи напруга на ванні становить 4,2–4,5 В, але може збільшуватися за допомогою анодного ефекту, при якому газ обволікають анод і утворюється плівка, яка не проводить струм. Для усунення її необхідно періодично поповнювати глинозем в електроліт.

Процес електролізу алюмінію є дуже дорогим і енергоємним і потребує 14 000–16 000 кВт/год електроенергії на тонну готової продукції.

Електролізні установки також використовуються для отримання великих об'ємів газів, таких як кисень, водень, хлор й інших шляхом розкладання води.

Електроди в таких установках виготовляють із заліза або нікелю. Під час електролізу на аноді створюються бульбашки з водню, які самостійно піднімаються по електроліту вгору, де і відбираються за допомогою спеціальних пристроїв, а потім по трубопроводу передаються в резервуари.

Процес отримання водню набагато складніший, він обумовлюється утворенням під час електролізу в навколокатодній області бульбашок із водню, які призводять до збільшення електричного опору і, відповідно, до збільшення втрат електроенергії.

### **6.3 Джерела живлення електролізних установок**

До джерел живлення електролізних установок належать генератори постійного струму, діодні або тиристорні випрямлячі.

Генератори постійного струму на сьогодні практично не використовуються. Це пояснюється низкою недоліків: низький ККД, низька надійність, висока вартість, експлуатаційні втрати. Найпоширенішими є діодні випрямлячі (агрегати). Типова однолінійна схема наведена на рисунку 6.3.

На понижувальній підстанції відбувається трансформація напруги від 220 кВ до 10 кВ, яке є первинним напругою для діодних перетворювальних агрегатів ПА1...ПА6, які є джерелами постійного струму для електролізних установок. Вони формуються за системою «трансформатор-випрямляч», основними силовими елементами яких є такі: спеціальний трансформатор перетворює, дроселі насичення та діодні випрямлячі.

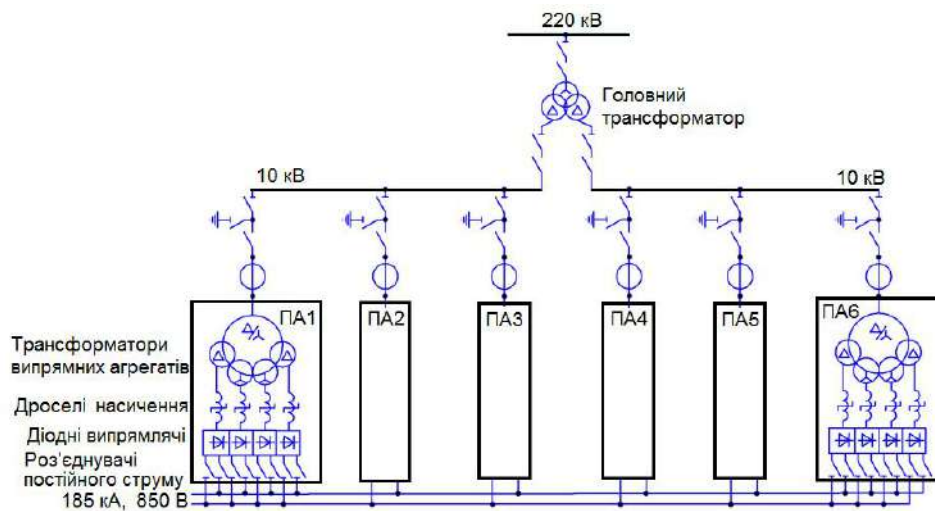


Рисунок 6.3 – Однолінійна схема перетворювальної підстанції з діодними агрегатами

У перетворювальних агрегатах регулювання випрямленої напруги виконується як поступово, так і плавно. Ступінчасте регулювання виконується по первинній обмотці трансформатора за допомогою пристрою регулювання під напругою (далі РПН) шляхом перемикання кінців обмотки. Плавне регулювання в межах одного-двох ступенів пристрою РПН здійснюється за допомогою дроселів насичення.

Головними недоліками діодних випрямлячів є такі:

- обмеженість глибини регулювання напруги, яка на практиці становить близько 60 %. На таку саму величину необхідно підвищувати габаритну потужність трансформатора перетворювального агрегату;

- неможливе забезпечення рівності напруг частин, сполучених за схемою «трикутник» і «зірка» у зв'язку з невеликою кількістю витків вторинної обмотки трансформаторів. Тому вирівнювання навантаження у випрямних блоках виконується шляхом затримки початку комутації в блоках, які підключені до частин вторинних обмоток, з'єднаних за схемою «трикутник». Така необхідна міра сприяє появі нерівності міжкомутаційних інтервалів і виникненню вищих парних гармонік у мережі;

- поява врівноважених струмів між фазозсувними частинами, оскільки частини вторинних обмоток трансформаторів виконуються за допомогою переплетених із черговістю котушок, з'єднаних за схемою «трикутник» і «зірка». Для обмеження врівноважених струмів пакети збірних шин, що йдуть від випрямних блоків, які підключені до сполук «трикутник» і «зірка», в електролізері виконуються ізольованими.

Зазначені недоліки вдається обійти в тиристорних випрямних установках (рис. 6.4). Відповідно до схеми є шість тиристорних

перетворювачів (ПА1 – ПА6) із вихідними параметрами 40 кА, 1000 В. Тиристори з'єднані за схемою «подвійний міст». Спеціальні трансформатори випрямних агрегатів без регулювання напруги мають дві активні частини, які з'єднані за схемою «зірка» та «трикутник». Регульовані автотрансформатори мають дев'ять ступенів регулювання, з яких два призначені для компенсації зниження напруги мережі. Глибина регулювання напруги становить 15 %. У разі необхідності автотрансформатори можуть бути відключені за допомогою роз'єднувачів.

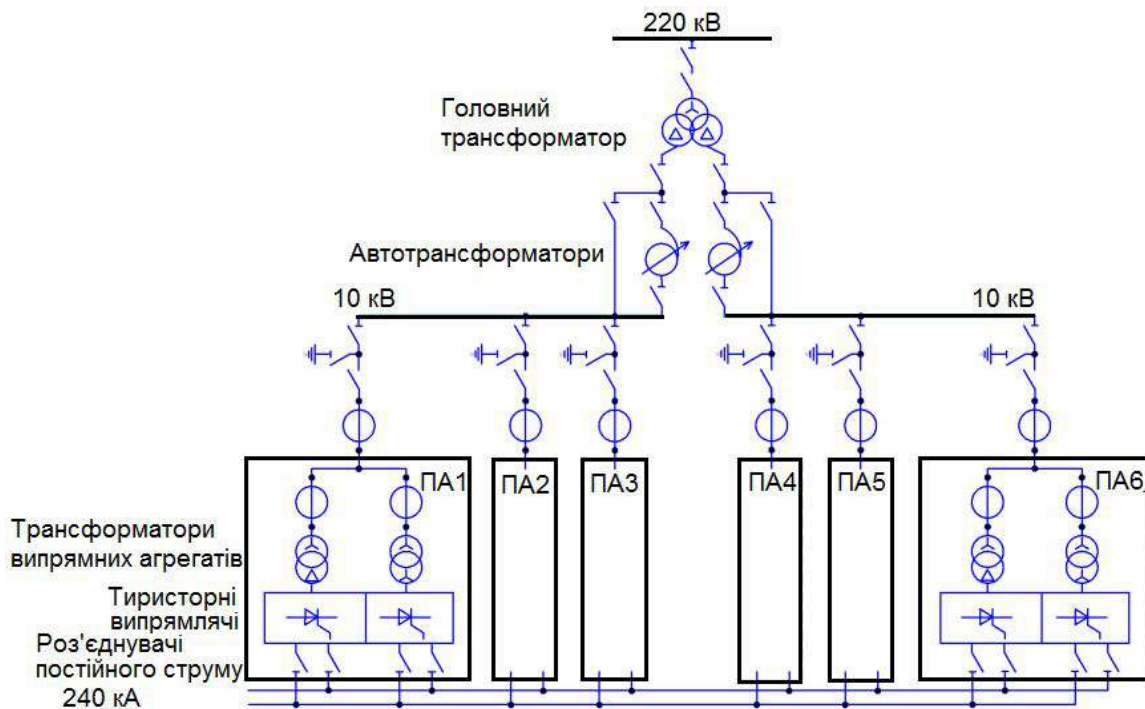


Рисунок 6.4 – Однолінійна схема перетворювальної підстанції з тиристорними агрегатами

У сучасних зразках тиристорних випрямних агрегатах використовують імпульсно-фазове регулювання, яке забезпечує рівність кутів керування різних фаз, що виключає появу вищих парних гармонік у напрузі мережі. Використання тиристорних випрямних агрегатів, забезпечує значно вищий, ніж у діодних, рівень стабілізації струму в динамічних режимах роботи. Також обмеження аварійних струмів досягається шляхом швидкої зміни величини кута керування.

Усе зазначене вище забезпечує підвищення якості керування струмом, зменшення вартості обладнання та експлуатаційних витрат.

## 6.4 Електролізні установки гальванотехніки

Гальванотехніка становить сферу прикладної електрохімії, де використовуються процеси електролітичного осадження металів на поверхні металевих і неметалевих виробів.

Гальванотехніка поділяється на *гальваностегію* та *гальванопластику*.

*Гальваностегія* – це процес (рис. 6.5) електролітичного нанесення покриття на поверхні металевих і неметалевих виробів із метою підвищення їхньої механічної міцності, корозійної стійкості та поліпшення декоративних якостей.

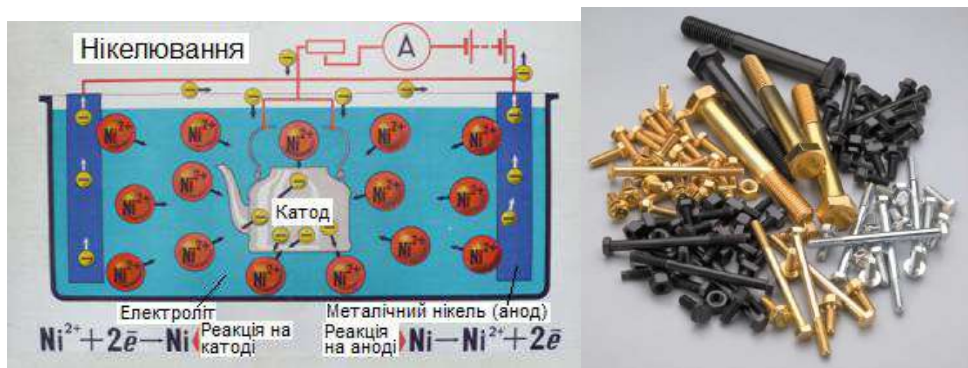


Рисунок 6.5 – Процес гальваностегії та металеві вироби

Процес гальваностегії базується на перенесенні металу анода на катод. Анод є розчинним в електроліті та його виготовляють у вигляді прутка або пластини із матеріалу.

Функцію катода виконує виріб, на який необхідно нанести покриття. Якщо матеріал виробу (катод) не є провідником електричного струму, то його поверхню спочатку покривають тонким шаром порошку зі струмопровідного матеріалу.

Анод і катод поміщують у ванну з електролітом і після підводу до них напруги від джерела постійного струму внаслідок електролізу відбувається перенесення іонів матеріалу анода на поверхню катода.

Іноді використовують аноди з металів або сплавів, які не розкладаються в електроліті (свинець). У таких установках метал, який осідає на катоді, виходить тільки з електроліту (водний розчин солей того металу, який наноситься на виріб), солі якого є його обов'язковим складником і систематично поповнюються в процесі роботи.

У промислових умовах гальваностегію здійснюють у спеціальних ваннах. Каркас ванни виготовляється зі сталі у вигляді зварної конструкції прямокутної форми (рис. 6.6). Сучасні зразки ванн виготовляються з пропілену, який є син-

тетичним термопластичним полімером. Такі ванни мають високий запас міцності, високу водостійкість.

По бортах ванни (1) встановлюються катодні й анодні шини (3), які підключаються до джерела постійного струму. На підвісках, установлених на катодних шинах, підвішуються вироби, на які наносяться покриття. Для забезпечення постійного теплового режиму на днищах ванн установлюється змійовик (2), по якому протікає гаряча вода.

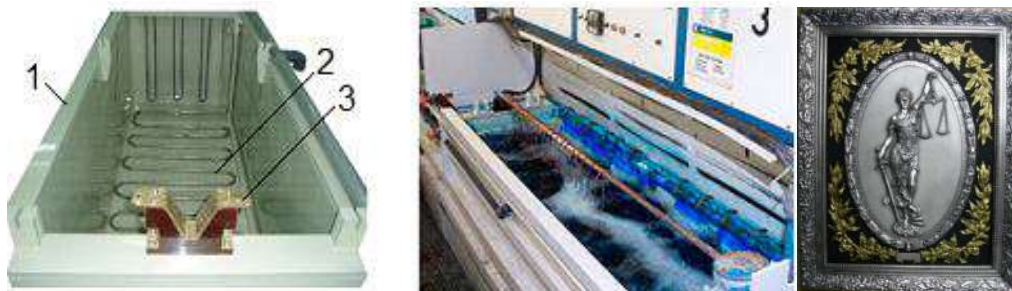


Рисунок 6.6 – Гальванічна ванна та виріб:

1 – корпус; 2 – змійовик; 3 – шина

У промислових умовах при масовому виробництві використовують механізовані або автоматичні гальванічні лінії для виконання підготовчих операцій (знежирення, травлення тощо).

Склад і конструкція обладнання, що входить до гальванічної лінії, залежить від особливостей технологічного процесу, кількості видів покриттів, номенклатури виробів тощо.

Загалом автоматична гальванічна лінія має в своєму складі такі елементи (рис. 6.7):

- набір технологічних ванн;
- завантажувально-навантажувальні пристрої;
- металоконструкцію (каркас);
- пристрої для переміщення підвісок, які укомплектовані за допомогою систем автоматизованого керування;
- транспортні шляхи та система вентиляції;
- випрямні агрегати; насоси; установки для фільтрації тощо.





Рисунок 6.7 – Гальванічна лінія

Прикладами гальваностегії є такі:

- цинкування – процес гальванічного покриття виробів для захисту їхніх поверхонь;
- анодування – процес отримання оксидних плівок на поверхні виробів з алюмінію, магнію, титану та їхніх сплавів. До того ж підвищуються антикорозійні властивості виробів, твердість і стійкість до механічних впливів, а також декоративних якостей;
- нікелювання – процес нанесення шару нікелю і його сплавів на поверхню виробу, що забезпечує підвищення механічної міцності та зносостійкості, а також поліпшуються декоративні якості виробів;
- хромування – забезпечує поверхні високі зносо- і жаростійкі властивості, а також стійкість від корозії, покращує електромагнітні властивості й декоративні якості виробів;
- сріблення та позолочення – підвищує антикорозійні властивості виробів і покращує декоративні якості.

*Гальванопластика* – процес (рис. 6.8) електролітичного нанесення металевих покриттів на шаблони (форми) із метою отримання точних копій з оригіналу. З використанням гальванопластики виготовляють копії статуй, предметів інтер'єру тощо.



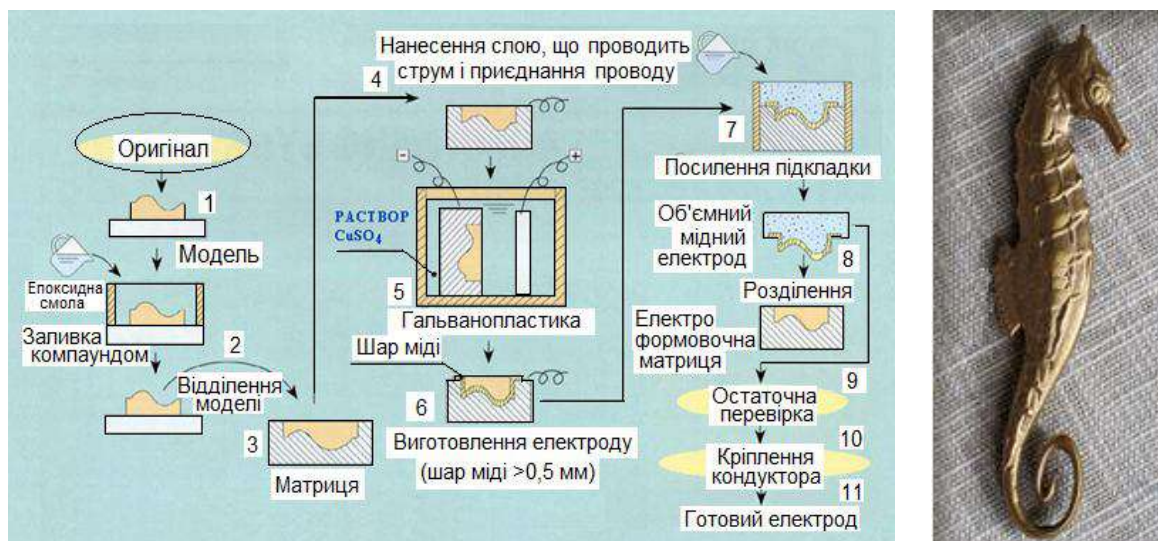


Рисунок 6.8 – Процес гальванопластики та виріб

Процес отримання гальванокопій передбачає такі операції:

- виготовлення матриці (форми) – відбиток, що має дзеркальне відображення оригіналу. Використовується гіпс, віск, високополімерні матеріали;
- нанесення струмопровідного шару на струмопровідний оригінал;
- зарядка матриці шляхом спорядження її контактними провідниками, які забезпечують електричний контакт із матеріалом матриці й катодного штангою. Провідники виготовляють із мідного або латунного дроту;
- завантаження матриці у ванну та виконання безпосередньо гальванопластики. Матриця виробу, у якого поверхня оброблена графітом, розміщується в ванні з електролітом (рис. 6.9).

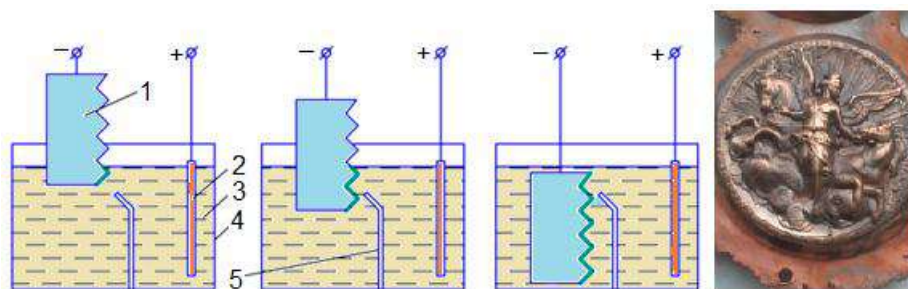


Рисунок 6.9 – Спосіб отримання гальванопластичного покриття

Під час поступового занурення матриці в електроліт:

- 1 – матриця; 2 – анод; 3 – електроліт; 4 – ванна; 5 – екран

Після занурення до анода і катода підводиться напруга. Якщо матриця має срібну поверхню, то спочатку підводять до анода та катода напруга, а потім виріб занурюють в електроліт.

Основним завданням процесу є рівномірність покриття поверхні, яке досягається різними способами. Наприклад, матриця занурюється в електроліт поступово і у процесі занурення відбувається екранування тієї частини поверхні, на якій вже утворився шар металу.

### **6.5 Джерела живлення для електролізних установок гальванотехніки**

Джерела живлення для електролізних установок гальванотехніки є випрямні агрегати, що підключаються до мережі 220/380 В, частотою 50Гц.

На сьогодні в промисловості найпоширеніші тиристорні (серії ТІ, ТЕР, ТБ, ТВР) та інверторні (серії ВІ, ВИР, ВІЦ, ВІЦР) агрегати.

Тиристорні випрямні агрегати (рис. 6.10) виготовляються нереверсивними (серії ТІ, ТВ) та реверсивним (серії ТЕР, ТВР) із повітряним (серії ТІ, ТЕР) і водяним (серії ТБ, ТВР) охолодженням.

Тиристорні агрегати виконують такі функції:

- автоматичну стабілізацію вихідної напруги;
- автоматичну стабілізацію вихідного струму;
- автоматичну стабілізацію щільності струму;
- ручне керування без стабілізації;
- ручний реверс струму;
- ручне керування величиною стабілізованого вихідного струму або напруги при прямому і зворотному напрямку струму;
- автоматичний реверс струму при роздільній тривалості імпульсів струму прямого та зворотного напрямку.



Рисунок 6.10 – Тиристорні випрямні агрегати

*Інверторні випрямні агрегати.* Принцип дії таких агрегатів базується на високочастотному перетворенні електричної енергії, що порівняно з тиристорними перетворювачами та відбувається значно довше.

Живлення агрегату здійснюється від трифазної чотирипровідної лінії змінного струму напругою 220/380 В, частотою 50 Гц (рис. 6.11).

У блоці випрямлення БВ відбувається перетворення змінної напруги в постійну з номінальним значенням 510 В. У високочастотному перетворювачі напруги (далі ВПН) постійний струм інвертується в змінний з частотою 12–18 кГц. Високочастотний трансформатор Т забезпечує зниження напруги, а у вихідному випрямлячі (далі ВВ) відбувається перетворення високочастотної напруги в постійну. Високочастотний трансформатор має феритове осердя, а вихідний випрямляч побудований на діодах Шотткі, які мають високу швидкодію та малі значення падіння напруги, що забезпечує істотне підвищення ККД.

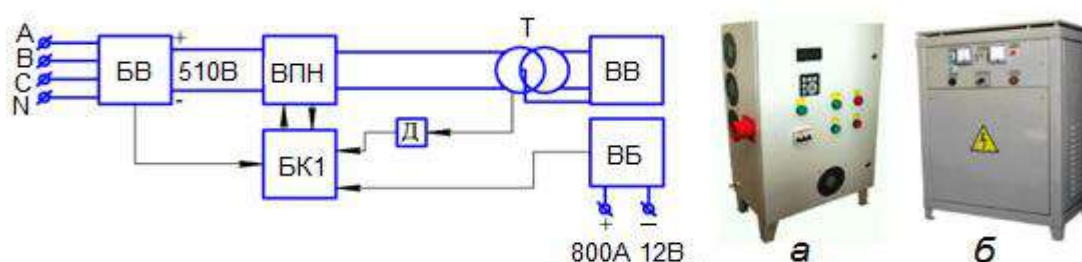


Рисунок 6.11 – Блок схема випрямного агрегату та інверторні випрямні агрегати зі схемами керування:

а - цифровий; б - аналоговий:

БВ – блок випрямлення; ВПН – високочастотний перетворювач напруги;

Т – високочастотний трансформатор; ВВ – вихідний випрямляч;

Д – давач; ВБ – вимірювальний блок; БКІ – блок керування та інформації

Переваги інверторних випрямних агрегатів:

– маса агрегатів зменшується в 7–8 разів порівняно з тиристорними агрегатами;

– економія енергії становить 20–30 %.

Випускаються інверторні агрегати як з аналоговою, так і цифровою схемою керування. Це дає можливість при комплексній автоматизації процесів гальванотехніки використовувати комп’ютерні технології. Головні технічні характеристики випрямних агрегатів наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Технічні характеристики інверторних випрямних агрегатів

Параметри	ВІ, ВІР	ВІЦ, ВІЦР
Напруги мережі живлення, В	380±10%	
Вихідний струм, А	50–800	400–3 200
Вихідна напруга, В	12; 24; 48	
ККД, %	85	
Точність автоматичної стабілізації, %	±2	±1
Дискретність сили струму	–	1–10
Діапазон регулювання сили струму	5–100	
Охолодження	Повітряно–примусове	

### 6.6 Електролізні установки як приймачі електричної енергії

Електролізні установки є також приймачами електричної енергії, і більшої з них властиві тривалий режим роботи та тільки деяким – повторно-короткочасний.

Електролізні установки для одержання чистих металів та газів належать до приймачів І категорії надійності електропостачання. Електролізні установки гальванотехніки здебільшого є приймачами ІІ категорії.

Електролізні установки є енергоємними. Дані про питомі втрати електроенергії на електроліз різних металів показані в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Питомі втрати електроенергії на електроліз металів

Назва металу	Питомі втрати, кВт·час/т
Мідь	320–360
Нікель	1 700–3 700
Цинк	3 200–3 300
Марганець	7 000–8 000
Магній	13 000–14 000
Алюміній	13 000–16 000
Галій	5 190 000

Установки мають підвищені вимоги щодо точності підтримки напруги джерела живлення або щільності струму. ККД установок коливається від 0,7 до 0,97.

Деякі ванни є низьковольтними приймачами електричної енергії з великими значеннями сили струму. Об'єднання ванн у серії до декількох десятків, а то і сотень послідовно з'єднаних, обумовлено підвищенням напруги. Дані параметрів деяких електролізних установок показані в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Параметри електролізних установок

Технологічний процес	Сила струму, кА	Напруга, В
Електроліз коштовних матеріалів	0,5–2 000	12–150
Електроліз галію	6–12	12–48
Електроліз міді	12–30	200–400
Електроліз нікелю	12–30	100–600
Електроліз цинку	12–30	700–900
Електроліз хлору	50–250	200–600
Електроліз алюмінію	50–300	600–1 200
Електроліз магнію	100–120	200–600
Гальваностегія, гальванопластика	1,25–25	12–48

### Контрольні питання

1. Дайте визначення та поясніть принцип дії електролізних установок.
2. Поясніть особливості роботи електролізних установок для отримання чистих металів із водних розчинів.
3. Поясніть особливості роботи електролізних установок для отримання чистих металів із розплавлених сполук солей.
4. Поясніть призначення головних складників частин електролізера для електролізу алюмінію та роботу установки.
5. Поясніть особливості роботи електролізних установок для одержання газів.
6. Які головні вимоги висуваються до електролізних установок при отриманні чистих металів та газів?
7. Дайте характеристику генераторів постійного струму як джерел живлення електролізних установок для одержання чистих металів та газів.
8. Дайте характеристику діодним агрегатам як джерел живлення електролізних установок для одержання чистих металів та газів.
9. Поясніть призначення головних складників перетворювальної підстанції з тиристорними агрегатами.
10. Поясніть призначення та особливості роботи електролізних установок для гальваностегії.
11. Які покриття отримують в установках для гальваностегії?
12. Поясніть призначення та особливості роботи електролізних установок для гальванопластики.
13. Які джерела живлення для електролізних установок гальванотехніки Ви знаєте?
14. Дайте характеристику електролізних установок як приймачів електричної енергії.

## **7 ЕЛЕКТРОННО-ІОННІ УСТАНОВКИ**

- 7.1 Електронно-іонні установки газоочищення (електрофільтри).
- 7.2 Електронно-іонні установки електросепарації сипучих сумішей.
- 7.3 Електронно-іонні установки для електрофарбування.
- 7.4 Електронно-іонні установки для електродруку.

Електронно-іонними (електростатичними) установками називаються такі електротехнологічні установки, в яких використовується дія електростатичного поля високої напруженості на речовину, яка перебуває у твердому, рідкому і газоподібному стані, із метою зміни її фізичних або хімічних властивостей, що досягається зазвичай шляхом спрямованого розподілу їхніх складових частин.

Робота таких установок заснована на використанні таких явищ:

- електрофорез – рух частинок, що перебувають у зваженому стані в рідкому або газоподібному середовищі, під дією електростатичного поля;
- електросепарація (електростатичне збагачення) – відділення від суміші необхідних компонентів унаслідок дії сильного електростатичного поля на електрично заряджену суміш;
- електроосмос – рух рідини через капіляри та пористі діафрагми під дією електростатичного поля.

Під час проходження всіх цих явищ під дією електростатичного поля відбувається переміщення окремих іонів, мікрочастинок речовини, які складаються з врівноваженої великої кількості молекул.

### **7.1 Електронно-іонні установки газоочищення (електрофільтри)**

Електронно-іонними установками газоочищення називають електротехнологічні установки, в яких використовується коронний розряд для заряджених частинок, що перебувають у газовому середовищі й у твердому або рідкому стані в електростатичному полі. Такі установки застосовуються у чорній і кольоровій металургії, енергетики, хімічної та гірничодобувної промисловості тощо.

Принцип дії електрофільтра (рис. 7.1) полягає в такому.

Живлення установки походить від лінії змінного струму. Трансформатор  $T$  здійснює підвищення напруги, а високовольтний випрямляч  $VD$  перетворює його в постійну.

Коронний електрод (2) з'єднаний із негативним, а електрод (5), який осаджує, із позитивним полюсом високовольтного випрямляча. Через ввідний патрубок (1) у середину електрода (5) подається забруднене повітря.



При достатньої різниці потенціалів між коронним електродом (2) та електродом (5) виникає різко неоднорідне електростатичне поле зі стійким коронним розрядом. Більшість частинок забрудненого повітря в електростатичному полі заряджаються негативно та направляються до внутрішніх стінок електрода (5) й осідають на ньому. Окремі частинки повітря набувають позитивний заряд і осідають на коронному електроді (2). Очищене повітря виходить через вихідний патрубок (4).

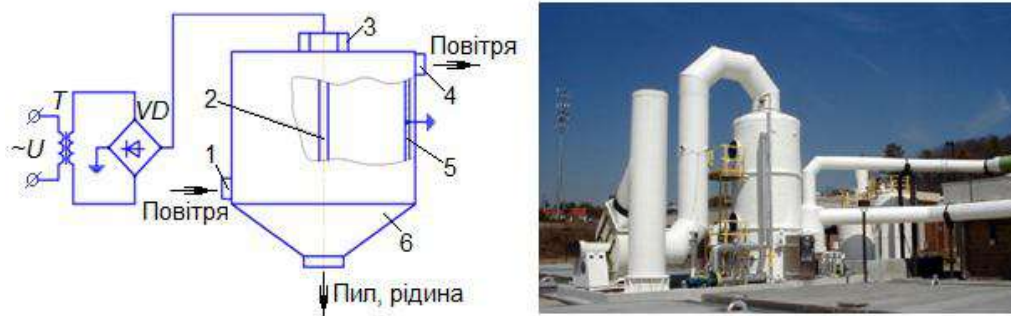


Рисунок 7.1 – Схема електрофільтра та промислова установка:  
1, 4 – ввідний та вивідний патрубки; 2, 5 – коронний електроди, які осаджують;  
3 – високовольтний ввід; 6 – бункер

Залежно від виду частинок, які осідають на поверхні електрода (5) і способу їх виділення, електрофільтри класифікують на сухі й вологі.

У сухих електрофільтрах зняття частинок пилу з електродів відбувається за допомогою механізмів ударно-молоткового типу. Пил опадає в бункер (6) і видаляється.

У вологих електрофільтрах осадження з поверхні електрода змивається за допомогою рідини або стікає самопливом.

Залежно від напрямку руху газу електролітичні фільтри класифікують на вертикальні й горизонтальні.

Сучасним зразком електрофільтрів можуть бути електрофільтри серії ЕГБМ (рис. 7.2), які призначені для високоефективного очищення газів і повітря під час технологічного процесу (сушіння; переробки сипких матеріалів тощо).

Такі фільтри широко застосовуються в чорній і кольоровій металургії, теплоенергетики, промисловості будівельних матеріалів тощо.

Технічні дані електрофільтра серії ЕГБМ наведені в таблиці 7.1.

Переваги електрофільтрів:

- високий рівень очищення газів – до 99,95 %;
- можливість виявлення твердих і рідких частинок розміром від 0,01 мкм (віруси, тютюновий дим тощо) до десятків мкм;
- низький гідравлічний опір, що становить близько 0,2 кПа.



Рисунок 7.2 – Високоєфективні очисні установки серії ЕГБМ

Таблиця 7.1 – Технічні характеристики електрофільтрів серії ЕГБМ

Параметри	Значення
Умовна висота електроду, м	4; 6; 7,5; 9; 10,5; 12; 13,5
Міжелектродний шаг, мм	300; 350; 400
Кількість газових проходів, шт	від 8 до 88
Довжина електричного полю, м	2,56; 3,2; 3,84; 4,48; 5,12
Кількість полей, шт	2–6
Продуктивність по газу, що очищений, тис. м <sup>3</sup> /год	50–1300
Температура газу, що очищений, °С	330
Вхідна запиленість газів, г/м <sup>3</sup>	90

## 7.2 Електронно-іонні установки електросепарації сипучих сумішей

*Електросепарація* сипучих сумішей – це процес поділу сипучих дрібнозернистих сумішей або подрібнених матеріалів (насіння, рослин, промислових відходів тощо) в електричному полі сепаратора (рис. 7.3).

Принцип роботи електросепаратора базується на тому, що окремі частинки матеріалу в електростатичному полі отримують різні заряди залежно від їхніх розмірів, електричних властивостей, хімічного складу, щільності і тощо. Від величини заряду в кожній окремо взятій частинки залежить величина сили її притягнення до транспортерної стрічки в зоні розрядки.

Від електродвигуна (7) стрічка транспортера (5) приводиться в рух. З бункера (1) матеріал, що сепарується, розсипається тонким шаром на транспортерній стрічці. Під час руху частка матеріалу потрапляє в зону А, яка є зоною зарядки в електричному полі між коронним електродом (2) і транспорте-

рною стрічкою (5), яка виконує функцію електрода, що осаджує окремі частинки матеріалу.

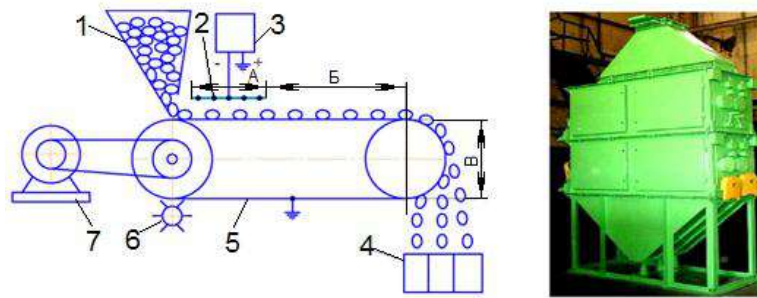


Рисунок 7.3 – Схема коронного електросепаратора конвеєрного типу:  
 1 – бункер загрузки; 2 – коронний електрод; 3 – джерело високої напруги;  
 4 – класифікатор; 5 – транспортерна стрічка; 6 – щітка; 7 – електродвигун;  
 А – зона зарядки; Б – зона розрядки; В – зона поділу

У зоні поділу на кожен частку, крім сил тяжіння діють дві сили: тяжіння та відцентрова. Під дією результуючої сили окремі частинки відриваються в різних місцях нижній частині зони поділу, що дає змогу розділити суміш на окремі фракції з певними однорідними показниками та зібрати їх в окремих секціях класифікатора 4.

Для очищення транспортерної стрічки від залишків частинок, які прилипли до стрічки, передбачена щітка 6. Прикладом коронно-електростатичного сепаратора є серія СЕ-24 (див. рис. 7.3).

Технические характеристики коронно-електростатического сепаратора наведені в таблиці 7.2.

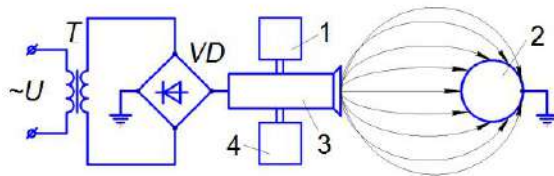
Таблиця 7.2 – Технічні характеристики коронно-електростатичного сепаратора типу СЕ-24/150-2

Параметри	Значення
Кількість технологічних секцій	2
Продуктивність по вихідному живленні, м <sup>3</sup> /час	1,2(3,0)
Крупність вихідної суміші, мм	0,04 – 2,0
Температура вихідної суміші, °С	150
Довжина робочої зони електрода, що осаджує, мм	1500
Діаметр електрода, що осаджує, мм	240
Частота обертання електрода, що осаджує, в залежності від приводу, об/хв	160; 200; 240; 300; 360
Номінальна потужність приводу електрода технологічної секції, що осаджує, кВт	0,75

### 7.3 Електронно-іонні установки для електрофарбування

Робота електронно-іонних установок для електрофарбування базується на використанні електростатичних сил для дроблення, перемішування, перенесення та осадження частинок лакофарбового матеріалу на поверхню виробу, який підлягає фарбуванню (рис. 7.4). Живлення установки здійснюється від джерела змінного струму через підвищувальний трансформатор  $T$  і високовольтний випрямляч  $VD$ . Процес фарбування з використанням таких установок відбувається у такий спосіб.

З резервуара (1) (див. рис. 7.5) лакофарбовий матеріал надходить у розпилювач (3) і дробиться там за допомогою енергії стиснутого повітря, який підходить від компресора (4), а також під дією центробіжних сил електричного поля. Електричне поле високої напруги (60–140 кВ) створюється між заземленим виробом (обложений електрод) і розпилювачем (коронний електрод).



1 – резервуар із фарбою; 2 – виріб для фарбування; 3 – розпилювач фарби; 4 – компресор

Рисунок 7.4 – Електронно-іонні установки для електропокраски виробів

Заряджені дрібні частинки лакофарбового матеріалу виштовхуються з камери розпилювача та переміщуються в напрямку силових ліній електростатичного поля до виробу 920 і рівномірно осідають по всій його поверхні. Створення фарбувального факела, форма якого зумовлена формою ліній електростатичного поля, що дає змогу здійснювати фарбування не лише фронтальних відносно розпилювача, але й інших поверхонь виробу.

Переваги установок електронно-іонної електрофарбування:

- менше втрати лакофарбових матеріалів, які становлять 5–10 %;
- висока якість лакофарбового покриття;
- можливість фарбування з усіх боків виробів без втрат лакофарбового матеріала.

Недоліки:

- неможливість або висока складність повного фарбування поверхонь і конструкцій, які мають глибокі западини та складні з'єднання;
- високі вимоги до лакофарбових матеріалів;
- висока ціна установок;
- високі вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу.

## 7.4 Електронно-іонні установки для електродруку

Принцип роботи електронно-іонних установок для електродруку базується на створенні потоку монодисперсних крапель рідини, подання кожної з них електричного заряду та керування рухом зарядженої краплі до моменту попадання її на поверхню друку. Найпрогресивнішими зразками таких установок є електрокаплеструйні маркувальні пристрої (принтери, рис. 7.5), що призначені

для нанесення різної інформації (літерно-цифрової, малюнка і тощо) на поверхню виробу.

Рідина (фарба, чорнила) подається в генератор (1) (див. рис. 7.5) із сопла якого вона виходить у вигляді тонкого струменя монодисперсних крапель.

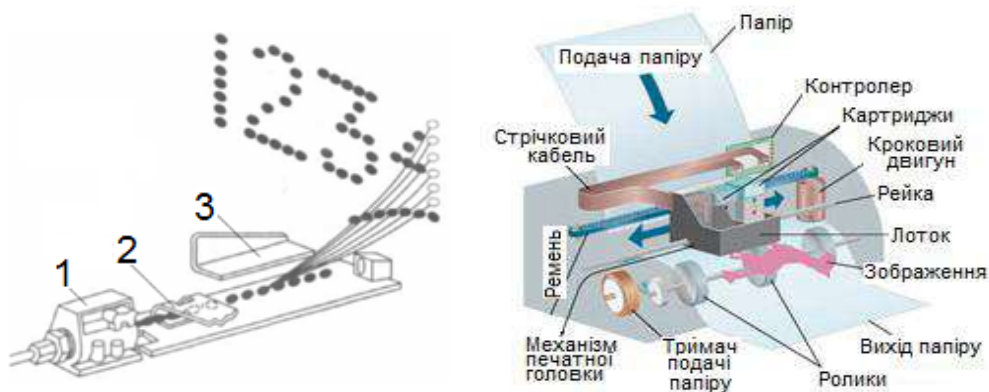


Рисунок 7.5 – Електроустановки та принтер для друку:

1 – генератор монодисперсних крапель; 2 – електроди зарядки;  
3 – електроди керування

Під час проходження струменя крапель через зону дії електростатичного поля, яка створює електроди зарядки (2), кожній із крапель дається однаковий електричний заряд.

Після цього заряджені краплі потрапляють у зону дії електричного поля електродів керування 3. Ці електроди створюють імпульси електричного поля які відповідні спеціальної програми. Під дією імпульсів електричного поля кожній з електрично заряджених крапель задається певний кут відхилення та забезпечується своя траєкторія руху. На поверхню виробу наноситься маркування внаслідок визначених програмою розміщень на ній крапель рідини.

Такі пристрої широко застосовуються під час маркування різних виробів, особливо тих, що виготовляються на високотехнологічних лініях: продуктів харчування; проводів і кабелів; стрічок різних матеріалів тощо.

Ці установки легко монтуються в автоматичні технологічні лінії та забезпечують нанесення маркування без її зупинки. Приклад маркувального комплексу наведений на рисунку 7.6. До базового складу комплексу входить принтер і транспортний пристрій.

Технічні дані комплексу наведені в таблиці 7.3.



Таблиця 7.3 – Технічні характеристики маркувального комплексу

Параметри	Тип PRO		
	Xs2	Xs3	Xs4
Максимальний робочий тиск рідини, атм	7	7	7
Максимальний робочий тиск повітря, атм	7	7	7
Вага розпилювача, г	667	711	788
Довжина розпилювача, см	21,8	24,6	28,2
Діапазон опору краски, мОм·см	7–150	7–∞	25–∞
Максимальна вихідна напруга, кВ	–	60	85
Максимальна робоча температура рідини, °C	48,8	48,8	48,8



Рисунок 7.6 – Маркувальний комплекс

Таким чином, на цей час існує велика кількість електронно-іонних установок, які виконують різноманітні функції. Вони постійно модернізуються, що дає можливість використовувати їх у різноманітних середовищах.

### Контрольні питання

1. Які електротехнологічні установки називають електронно-іонними, в чому полягає принцип їхньої дії?
2. Наведіть характеристику основних сил, які діють на тверду частку в електростатичному полі електронно-іонної установки.
3. У чому полягає принцип дії електрофільтрів?
4. Як відбувається електросепарація сипучих сумішей в електронно-іонних установках?
5. Які переваги та недоліки електронно-іонних установок для електрофарбування?

6. У чому полягає принцип дії електронно-іонних установок для електродруку?

7. Наведіть приклади сучасних зразків електрофільтрів, їхнє призначення та головні характеристики.

8. Наведіть приклади сучасних зразків коронно-електростатичних сепараторів, їхнє призначення та головні характеристики.

9. Наведіть приклади сучасних зразків фарборозпилювачів, їхнє значення та головні характеристики.

10. Наведіть приклади сучасних зразків електронно-іонних установок, їхнє призначення та головні характеристики.

## **8 УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ**

- 8.1 Особливості та принцип дії установок для обробки металів.
- 8.2 Установки для електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті.
- 8.3 Установки для розмірної електрохіміко-гідравлічної обробки.
- 8.4 Установки для розмірної електрохіміко-механічної обробки.
- 8.5 Установки для електрохімічної обробки як приймачі електричної енергії.

### **8.1 Особливості та принцип дії установок для обробки металів**

В установках для електрохімічної розмірної обробки металів відбувається перетворення електричної енергії в хімічну. Мета розмірної обробки – заміна стану поверхні, форми та розміру виробу.

Поява та подальше використання цього способу було обумовлено необхідністю обробки твердих, жароміцних, хімічно стійких, неіржавних і магнітних сталей, а також напівпровідникових матеріалів, які використовуються під час виготовлення турбін, реактивних двигунів, обладнання атомних електростанцій тощо. Обробка виробів із таких матеріалів традиційними механічними способами була ускладнена, а іноді та зовсім неможливою.

Принцип дії установок базується на явищі анодного (електрохімічного) розчинення матеріалу виробу під час проходження струму через електроліт, який подається в зазор між електродами. Матеріал виробу, який виконує функції анода, спочатку переходить із металевого стану в іонний шляхом віддачі металом електронів.

Наступним процесом є створення металевих з'єднань, склад яких залежить від хімічного складу електроліту й аноду. Продукти таких реакцій є розчинними в електроліті, і сам процес проводять вільно з перемішуванням електроліту. Щільність струму в електроліті невелика та дорівнює 2–3 А/см<sup>2</sup>.

Гідрат оксиду металу, який практично не розчиняється в електроліті, випадає в осад. Для видалення осаду, з метою усунення можливості засмічення міжелектродного зазору, електроліт подають з великою швидкістю. Щільність струму в електроліті може досягати сотень ампер на квадратний сантиметр.

Установки для електрохімічної розмірної обробки металів поділяються на три групи (рис. 8.1):

- установки для обробки в стаціонарному електроліті;
- установки для електрохіміко-гідравлічної обробки;
- установки для електрохіміко-механічної обробки.

## 8.2 Установки для електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті

Робота таких установок базується на анодному розчиненні матеріалу виробів і полягає в тому, щоб, наприклад, зняти з поверхні виробу зайвий шар металу з метою надання більшій гладкості поверхні (шліфування, полірування), її очищення (травлення), зміни форми (анодна обробка), нанесення зображення (маркування). Типовою особливістю роботи таких установок є те, що електроліту не сприяє примусовий рух у зону обробки, а його переміщення здійснюється природним шляхом за порівняно невеликих швидкостей. Процеси, що проходять під час проведення зазначених операцій, є однаковими та відрізняються один від одного лише щільністю струму, і, відповідно, швидкістю розчинення матеріалу виробу.

*Анодне полірування* відбувається за порівняно малих значень густини струму і швидкості розчинення матеріалу. Процес анодного полірування (рис. 8.2, а) полягає в тому, що під час електролізу найінтенсивніше будуть розчинятися виступаючі частини поверхні виробу (рис. 8.2, б), оскільки в заглиблених частинах накопичуються продукти розкладу, і щільність струму на цих ділянках є значно меншою.



Рисунок 8.1 – Класифікація установок для розмірної електрохімічної обробки

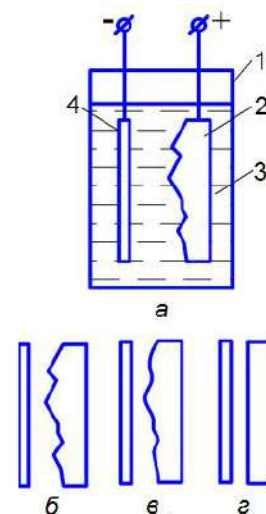


Рисунок 8.2 – Схема та етапи про-процесу анодного полірування:  
1 – ванна; 2 – вироби; 3 – електроліт; 4 – катод

Тому спочатку відбувається округлення виступаючих гострих ділянок поверхні (рис. 8.2, б), а потім – згладжування поверхні виробу (рис. 8.2, в).

Прикладами анодного полірування є: різноманітні вироби (рис. 8.3), а також внутрішнє полірування тонкостінних і звичайних труб, турбінних лопаток, робочих отворів арматури зі сталі та спеціальних сплавів, легованих зубчастих коліс тощо.

Процес *травлення* проводиться аналогічно до вказаної вище операції, але за умови значно великих густин струму і швидкості розчинності. Мета травлення зазвичай полягає в тому, що з поверхні виробу знімається шар металу, а разом із ним і шар окислів, бруду та жиру. Після такої операції жорсткість поверхні є дещо більшою, ніж після операції полірування.



Рисунок 8.3 – Зразки виробів після анодного полірування та травлення

Для проведення процесу *загострення* під час обробки металевих виробів із метою зміни їхньої форми застосовується установка, що показана на рисунку 8.4.

Такі установки призначені для загострення пруткових заготовок круглої, прямокутної та багатогранної форм; лез; катодів електронно-променевих установок тощо.

Виріб (3) закріплюється в головці (2) механізму рівномірного підняття/опускання. Електрод-інструмент (1) розміщується у ванні (4). Механізм забезпечує необхідну швидкість переміщення виробу вздовж осі симетрії електроду-інструменту. Унаслідок процесу електролізу відбувається анодне розчинення матеріалу виробу та його загострення на кінці. Характер загострення залежить від початкового кута загострення та розміщення виробу по електроду-інструменту.

*Електрохімічне маркування* використовується для отримання зображення на поверхні металевого виробу без її пошкодження. Принцип дії установки (рис. 8.5) полягає в анодному розчиненні металу під час проходження струму від електрода-інструмента (маркувальної головки) (1) до виробу (3) через шар електроліту безпосередньо (без трафаретне маркування) або через змочений електролітом трафарет (2) (трафаретне маркування).

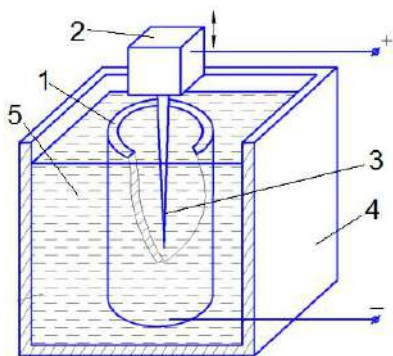


Рисунок 8.4 – Схема електрохімічної установки для виконання операції заготрення виробів: 1 – електрод-інструмент (катод); 2 – головка механізму опускання/піднімання; 3 – виріб (анод); 4 – ванна; 5 – електроліт

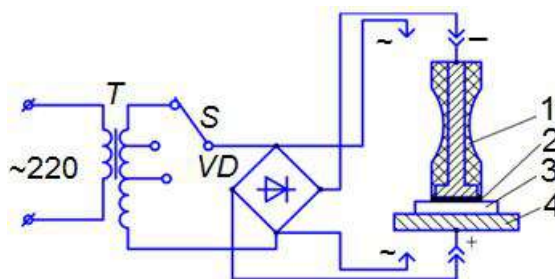


Рисунок 8.5 – Схема установки для електрохімічного маркування : 1 – електрод-інструмент; 2 – трафарет; 3 – виріб; 4 – робочий стіл

Під час *безтрафаретного маркування* на електрод інструмент, який виготовлений зі струмопровідного матеріалу, наноситься зображення, яке необхідно нанести на виріб. Поверхня із зображенням покривається шаром електроізоляційного матеріалу (пластмаси), а потім обробляється до появи зображення. Стіл (4), на якому розміщується виріб (3), підключають до позитивного полюса, а електроінструмент (маркувальну голівку) – до негативного полюса. Маркувальна голівка змочується електролітом. Під час контактування маркувальної голівки з виробом у середовищі електроліту відбувається анодне розчинення матеріалу виробу в місцях його контактування зі струмопровідними ділянками маркувальної голівки й отримання копії зображення на виробі. У разі такого маркування зображення на маркувальній голівці практично не зношується та його можна використовувати багато разів.

У процесі *трафаретного маркування* зображення наноситься на трафарет (трафаретну маску) (2), який виготовляється з металу, пластику тощо. У сучасних зразках електрохімічних установках для маркування трафаретні маски багаторазового використання виготовляються з хіміко- та термічно стійкого матеріалу, який має сітчасту структуру, що забезпечує високу якість і відмінність зображення. На таких трафаретних масках зображення може наноситися різними способами: печатанням за допомогою принтера, написанням чи малюванням ручкою тощо.

Трафарет змочується електролітом, склад якого обирається з урахуванням властивостей матеріалу виробу для досягнення кращої якості зображення. Як електроліт використовують зазвичай водні розчини одно- або багатокомпонентних нейтральних солей. Мета правильного підбору складу електроліту полягає



в забезпеченні мінімального часу обробки, чіткості й контрастності зображення та його корозійної стійкості.

У процесі трафаретного маркування трафарет (2) розміщується між клеймом і виробом. Під час проходження струму у наслідок електрохімічних реакцій, у середовищі електроліту зображення з трафарету переноситься на поверхню виробу внаслідок зміни кольору поверхні виробу або зміни рельєфу поверхні на невелику глибину (від 2 мкм до 200 мкм).

За допомогою перемикача (див. рис. 8.5) здійснюється регулювання напруги на виході трансформатора  $T$ , що подається на випрямляч  $VD$ . Таким способом досягається забезпечення необхідного значення сили струму з урахуванням властивостей матеріалу виробу, площі нанесення зображення тощо.

Переваги електрохімічного способу маркування:

- простота та висока продуктивність;
- можливість ручного, напіваавтоматичного та автоматичного виконання операцій;
- відсутність деформацій і концентрацій напруги, що дає змогу маркування виробів з тонких та ажурних листів,
- відсутність геометричних та структурних змін поверхні;
- висока якість і контрастність зображення;
- можливість маркування різних металевих виробів незалежно від їхніх розмірів, форми, механічних і хімічних властивостей матеріалу, а також виду первинної обробки.

Установки для електрохімічного маркування (рис. 8.5) широко застосовуються в авіаційному, автомобільному, інструментальному, електронному та інших виробництвах, а також у процесі маркування медичних виробів, столових приладів при нанесенні торгових марок, логотипів тощо.

Зразки виробів із маркуванням зображені на рисунку 8.6. Технічні характеристики для електрохімічного маркування наведені в таблиці 8.1.



Рисунок 8.5 – Установка для електрохімічного маркування



Рисунок 8.6 – Зразки електрохімічного маркування

Таблиця 8.1 – Технічні характеристики установок для електрохімічного маркування

Технічна характеристика	Модель					
	EU-80	EU-100	EU-300	EU-500	MODULMAT	
					300	500
Режим роботи	Ручний				Полуавтоматичний	
Вхідна напруга, В	~ 220					
Вихідна напруга, В	8; 16; 24 (~)	0–24 (~ / =)	0–30 (~ / =)			
Потужність, Вт	100		310	510	310	510
Габарітні розміри, мм	155× 200 × 150		140 × 380 × 220			

### 8.3 Установки для розмірної електрохіміко-гідравлічної обробки

Робота установок для розмірної електрохіміко-гідравлічної обробки базується на одночасному анодному розчиненні та винесенні матеріалу обробки струменем електроліту. Типовою особливістю установок є те, що в процесі роботи між виробом (анодом) та інструментом (катодом) відсутній безпосередній механічний контакт, а обов'язковим є зазор, в який подається електроліт. Швидкість анодного розчинення залежить від зазору між анодом і катодом: чим цей зазор менше, тим швидше відбувається розчинення анода – обробка виробу. Під час зближення електродів поверхня анода (виробу) повторює з великою точністю поверхню катода (інструменту).

Для видалення продуктів розчинення та оновлення складу електроліту обов'язковим є прокачування електроліту через зону обробки. Шляхом підбору складу електроліту в таких установках можлива обробка виробів з будь-яких струмопровідних матеріалів із забезпеченням високої якості обробленої поверхні.

*Установлення обробки різанням (рис. 8.7).* Робочим інструментом таких установок може бути: диск, стрічка або дріт.

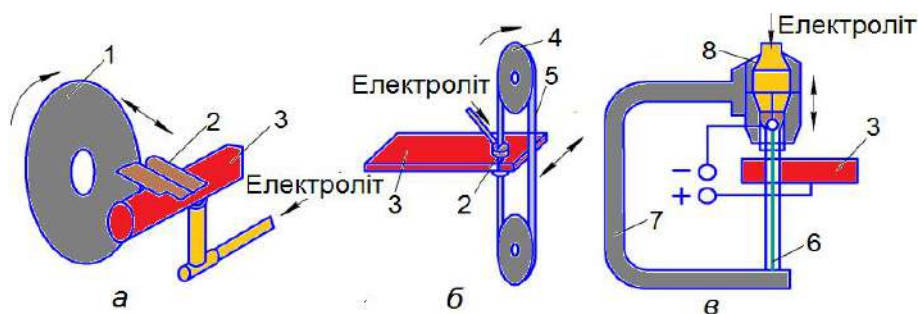


Рисунок 8.7 – Схеми установки для розмірної електрохіміко-гідравлічної обробки шляхом різання:

а – диском; б – стрічкою; в – проводом: 1 – диск; 2 – напрямна;  
3 – деталь; 4 – барабан; 5 – стрічка; 6 – провід;  
7 – скоба; 8 – головка

Безпосередньо в зону обробки подається електроліт. У процесі роботи рухомих може бути тільки інструмент-електрод, а виріб залишається нерухомим і закріплюється на робочому столі. Можливі також і погоджені одночасні рухи, як електрода-інструмента, так і виробів.

На установках із дисковим інструментом-електродом розрізають вироби завтовшки (діаметром до 160 мм), а вироби з великими розмірами розрізають на установках зі стрічковим або провідним інструментом – електродом. Стрічкові та провідні відрізні установки дають змогу також виконувати фігурне і поздовжнє розрізання.

*Установки для виконання копіювально-прошивних операцій (рис. 8.8).*

У процесі роботи електрод-інструмент (катод) (1) і заготовля (анод) (2) здійснюють періодичні рухи переважно в одних координатах (наприклад, вгору/вниз) без взаємного контактування. Обробка виконується на мінімальному допустимому міжелектродному зазорі, у якому постійно перебуває електроліт. У момент зближення електрода-інструмента та заготовки проходить імпульс технологічного струму і відбувається обробка заготовки. У момент розбіжності електрода-інструмента та заготовки технологічний струм відсутній, і в цей час відбувається прокачування електроліту (див. рис. 8.8 – показано стрілками) і видалення з робочої зони продуктів електролізу. Отвір, який утворюється в процесі обробки, із великою точністю повторює профіль електрода-інструмента (рис. 8.9).

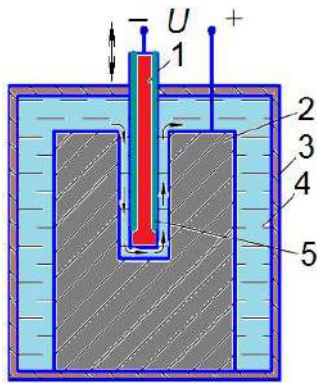


Рисунок 8.8. – Схема установки для виконання копіювально-прошивних операцій: 1 – електродний інструмент; 2 – заготовка; 3 – камера; 4 – електроліт; 5 – ізоляція



Рисунок 8.9 – Електродний інструмент (1) деталі (2) після виконання копіювально-прошивної операції

На установках для виконання копіювально-прошивних операцій оброблюються вироби, які мають як наскрізні, так і глухі отвори різної форми (рис. 8.10), а саме: сідло клапана компресора, магнітопровід ротора, муфти внутрішнього зчеплення; прес-форми; ротори гідротурбін тощо.

Прикладом установки для виконання копіювально-прошивних операцій є копіювально-прошивний верстат-автомат (рис. 8.11), який призначений для електрохімічної розмірної обробки поверхонь після штампування, пресування та лиття виробів з інструментальних сталей незалежно від твердості матеріалу заготовки.

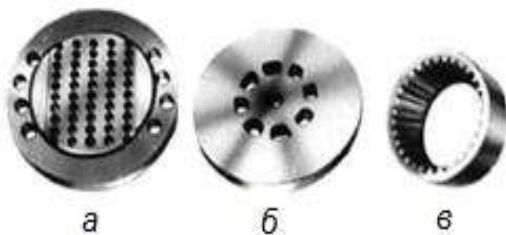


Рисунок 8.10 – Зразки виробів: а – сідло клапана компресора; б – магнітопровід ротора; в – муфта внутрішнього зчеплення



Рисунок 8.11 – Електрохімічний копіювально-прошивний верстат-автомат

У таких верстатах у процесі роботи електрод-інструмент, який закріплюється нерухомо в електротримачі віброголовки, гойдається у вертикальній площині з частотою 50 Гц. Заготівля закріплюється на столі верстата, і вони разом переміщуються вгору на зближення з електродом –інструментом.

У момент зближення проходить імпульс технологічного струму та відбувається обробка заготовки.

Переваги обробки виробів на верстатах:

- підвищена продуктивність обробки (швидкість знімання становлять 0,05–3,5 мм при площі обробки до 100 см<sup>2</sup>);
- висока точність поверхні після обробки;
- можливість зниження жорсткості поверхні під час обробки технологічним струмом;
- обробка виконується на низьких (менше 12 В) напругах з використанням електролітів нейтральних водних розчинів мінеральних солей (NaCl; NaNO<sub>3</sub>) що дає змогу підвищити електробезпеку для обслуговчого персоналу і уникнути можливості виникнення пожежі в зоні обробки.

Установки для виконання токарних та фрезерних операцій призначені для електрохімічної обробки шляхом точіння торців деталей тіл обертання (рис. 8.12).

Деталь (1), що становить тіло обертання, закріплюється в передній бабці (8). Інструмент-електрод (2) закріплюється на штанзі (6), через яку в зону обробки подається електроліт. Деталь і електрод-інструмент розміщуються в середині камери (7), заповненої електролітом. Обробка виконується на мінімально допустимому міжелектродному зазорі між деталлю та інструментом-електродом. Напрямок руху передньої бабки та патрона (3), із яким жорстко з'єднаний інструмент-електрод, показано стрілками.

Установки для виконання фрезерних операцій використовуються для обробки плоских, криволінійних поверхонь, зубчастих і черв'ячних коліс тощо. Приклади деталей, оброблених способом електрохімічного фрезерування, зображені на рисунку 8.13.

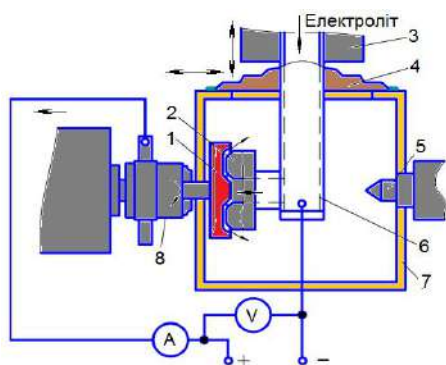


Рисунок 8.12 – Схема установки для виконання токарних операцій:

- 1 – деталь; 2 – електрод-інструмент; 3 – патрон; 4 – мідний диск; 5 – центр;
- 6 – штанга; 7 – камера;
- 8 – передня бабка



Рисунок 8.13 – Деталі, що оброблені способом електрохімічного фрезерування

## 8.4 Установки для розмірної електрохіміко-механічної обробки

Робота установок розмірної електрохіміко-механічної обробки (анодно-механічної) також базується на анодному розчиненні матеріалу виробу в середовищі електроліту. Однак на відміну від перших розглянутих установок у цих установках у процесі роботи відбувається механічне контактування електрода-інструмента й електрода-виробу. Тому використовується електрохімічна та механічна дія на виріб у зоні обробки.

На відміну від чисто механічної обробки з зусиллям, що виникають між виробом й електродом-інструментом під час електрохіміко-механічної обробки, значно менше, а продуктивність роботи таких установок зазвичай значно вище.

Установки для електрохіміко-механічної обробки поділяють на дві групи: для чистової та чорнкової анодно-механічної обробки.

*Установки для чистової анодно-механічної обробки* (рис. 8.14). Принцип дії установок полягає в тому, що інструмент (катод) (3) і виріб (анод) (4) перебувають у середовищі електроліту (2) і через них проходить електричний струм невеликої щільності ( $0,5\text{--}10\text{ А/см}^2$ ). Унаслідок електролізу відбувається розчинення матеріалу виробу й осідання продуктів розчинення на поверхні. При нерухомих електродах на поверхні виробу виникає плівка (1) з продуктів розчинення, товщина якої з часом збільшується, що призводить до зростання електричного опору.

Для ефективної роботи установки та чистової анодно-механічної обробки обов'язковим є умови:

- велика швидкість відносного переміщення інструмента (катода) і виробу (анода);
- розташування анода та катода на мінімально можливій відстані один від іншого, яке забезпечувало б безпосереднє контактування, а також видалення плівки (1) за допомогою інструмента (3);
- обов'язкова безперервна наявність електроліту між виробом й інструментом.

За таких умов розчинення у вигляді плівки на поверхні деталі будуть виділятися, і у такий спосіб забезпечуватиметься обробка виробу з високим класом чистоти поверхні.

Видалення плівки з продуктів розчинення може відбуватися і не металевим інструментом (4) (рис. 8.16), наприклад, пластмасовим, дерев'яним або гумовим. У цьому разі вдається обійти електричне контактування анода і катода, а під дією порівняно невеликих механічних зусиль із боку інструменту можливо видаляти продукти розчинення виробу й у такий спосіб виконувати його обробку.



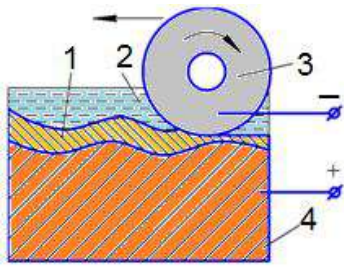


Рисунок 8.14 – Процес роботи установки для чистової анодно-механічної обробки: 1 – плівка з продуктів розчинення; 2 – електроліт; 3 – інструмент; 4 – виріб

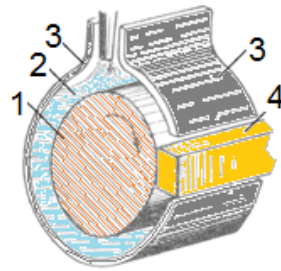


Рисунок 8.15 – Схема чистової анодно-механічної обробки неметалевим інструментом: 1 – виріб; 2 – електроліт; 3 – катодні пластини; 4 – інструмент для зняття плівки

Переваги установок для чистової анодно-механічної обробки:

- можливість отримання високої чистоти поверхні виробу;
- можливість зміни в широкому діапазоні якості поверхні виробу шляхом зміни електричного режиму без заміни інструмента та перестановки заготовки;
- незалежність результатів обробки від механічних властивостей матеріалу заготовки;
- простота інструмента;
- низькі питомі тиски інструмента на виріб.

Недоліки:

- відсутність низька продуктивність;
- відсутність необхідності постійної підтримки необхідного зазору між виробом та інструментом.

Різновиди установок для чистової анодно-механічної обробки є установки для електроабразивної та електроалмазної обробки.

Під час *електроабразивної обробки* функцію робочого інструмента виконує спеціальний струмопровідний диск, який виготовляється з суміші абразивних зерен із металевим порошком (металоабразивний) або графітом (графітоабразивний). Металева або графітова суміш забезпечує струмопровідні властивості абразивного круга, а за допомогою абразивних зерен виконується механічне видалення плівки з продуктів розчинення в зоні обробки. Як електроліт у таких установках, використовуються розбавлені розчини рідкого скла, нітратів, нітритів тощо.

Перевага установок:

- висока чистота поверхні деталей, які обробляються;
- можливість використання неагресивних електролітів;

– можливість використання як спеціальних анодно-механічних шліфувальних верстатів, так і звичайних шліфувальних верстатів, після нескладної їх модернізації;

– робота на безпечних напругах та при невеликій щільності струму, яка не надає термічну дію на виріб.

Недоліки:

– невисока продуктивність;

– необхідність використання спеціальних, значно дорогих кіл.

– значне зношення кола електрода;

– поява гострих кромek деталей після обробки.

Під час *електроалмазної обробки* функцію робочого інструмента виконує спеціальний диск, що має металеву основу з нанесенням на його робочу поверхню шару з алмазних зерен. Таке конструктивне виконання диску створює неможливий контакт металу диска й виробу та забезпечує дотримання найменших робочих зазорів (0,01–0,03 мм). Такі установки допускають велику щільність струму (300–500 А/см<sup>2</sup>), високу продуктивність, клас чистоти поверхні й мале зношення інструмента, що є їхньою перевагою, порівняно з іншими установками.

Недоліки: необхідність використання спеціальних, набагато дорожче алмазні диски замість традиційних.

Установки для *чорнкової анодно-механічної обробки* (рис. 8.16). Принцип роботи таких установок схожий на попередній, де інструмент (катод) і виріб (анод) також переміщуються з високою швидкістю, а в зону обробки постійно подається електроліт і відбувається розчинення матеріалу виробу.

Типовою відмінністю в роботі таких установок є таке:

– середнє значення щільності струму яка становить 10–500 А/см<sup>2</sup>;

– під час роботи установки обов'язковим є контактування металу виробу (анода) (5) та інструмента (катода) (3) в окремих точках (4) (див. рис. 8.16), що підвищує щільність струму шляхом збільшення точок контактування;

– обробка відбувається тільки за допомогою металевого інструмента, який під час роботи зношується, оскільки що також піддається тепловій дії процесів, які описані вище;

– значно зростає продуктивність роботи установки, оскільки поруч з анодним розчиненням матеріалу виробу та видаленням продуктів розчинення відбувається інтенсивне теплове електроерозійне руйнування поверхні виробу.

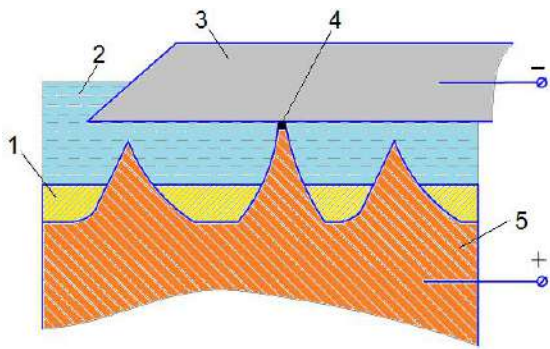


Рисунок 8.16 – Процес роботи установок для чорнкової анодно-механічної обробки: 1 – плівка з продуктів розчинення; 2 – електроліт; 3 – інструмент; 4 – місце контактування; 5 – виріб

Чорнова анодно-механічна обробка використовується при виконанні операцій різання, шліфування, розточування тощо.

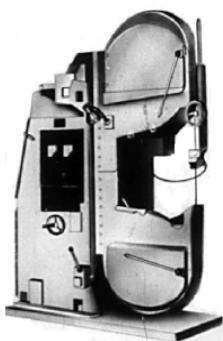
Переваги:

- висока продуктивність;
- зниження відходів;
- незначні механічні зусилля під час обробки;
- можливість обробки виробів із металів і сплавів практично будь-якої твердості;
- можливість зміни в певному діапазоні якості поверхні виробу без зміни інструменту та перестановки заготовки.

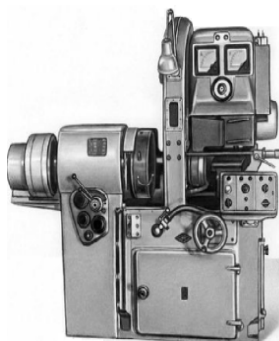
Недоліки:

- низька чистота обробки виробу;
- зміни в структурі поверхневого шару матеріалу виробу, які обумовлюються з термічним процесом;
- значне зношення електрода-інструмента;
- низька технологічність електроліту.

Базові моделі верстатів для анодно-механічної обробки зображені на рисунку 8.17 та рисунку 8.18. Технічні характеристики верстатів наведені в таблиці 8.2 і таблиці 8.3.



а



б

Рисунок 8.17 – Анодно-механічні станки: а – дисковий; б – стрічковий



Рисунок 8.18 – Полуавтомат плоскошліфувальний

Таблиця 8.2 – Технічні характеристики анодно-механічних верстатів

Параметри	Значення моделей	
	4A812	ME-12
Розміри деталей, мм: – діаметр, мм; – довжина, мм	160 10–4000	350 10–600
Розміри електроду-інструмента, мм	650 × 1,5 (діаметр×товщина)	5700 × 40 × 0,8 (длина×ширина× товщина)
Сила струму, А	320	800
Напруга, В	24/ 27/ 30	21/38

Таблиця 8.3 – Технічні характеристики полу автомата плоскошлифовального електрохімічного

Параметри	Значення
Найбільші розміри та маса виробу: – довжина, мм; – ширина, мм; – висота, мм; – маса, кг	630 200 320 200
Найбільше переміщення, мм: – столу; – шліфувальної головки	900 320
Дискретність переміщення шліфувальної головки, мм	0,001
Потужність головного приводу, кВт	11

### 8.5 Установки для електрохімічної обробки як приймачі електричної енергії

Більшість установок визначаються є тривалим режимом роботи та тільки частина з них – короткочасним.

Графік навантаження більшості установок, за умови контролю технологічного процесу, є рівномірним.

Установки здебільшого є приймачами II категорії електропостачання, і лише незначна їхня частина належить до приймачів I категорії.

Живлення установок здійснюється від лінії змінного струму напругою 380/220 В і частотою 50 Гц із подальшим зниженням до одиниць/десятків вольт і випрямленням у діодних або тиристорних випрямлячах. Технічні характеристики джерел живлення установок наведено в таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 – Технічні характеристики джерел живлення установок для електрохімічної розмірної обробки матеріалів

Вид обробки	Напруга, В	Щільність струму А/см <sup>2</sup>	Питомі втрати енергії, кВт·час/кг
Електрохімічне травлення	3–12	0,05–0,2	10–30
Електрохіміко-гідравлічна	2–24	50–200	8–15
Електрохімічне полірування	4–24	0,05–0,6	5–20
Анодно-механічна:			
– чорнова;	12–36	20–500	3–5
– чистова	4–16	0,5–10	8–15
Електроабразивна	2–16	0,5–10	8–15
Електроалмазна	2–16	0,5–10	8–15

Установки мають підвищені вимоги до точності підтримання напруги джерел живлення або щільності струму, оскільки їхня потужність прямо пропорційна до квадрату струму/напруги живлення, а від потужності, зі свого боку, залежить продуктивність і якість. ККД установок коливається від 0,7 до 0,95.

Установки з тиристорними випрямлячами є джерела вищих гармонік. Коефіцієнт потужності установок: при діодних випрямлячах  $\cos\varphi = 0,92\text{--}0,94$ ; при тиристорних випрямлячах  $\cos\varphi = 0,6\text{--}0,9$ .

### Контрольні питання

1. Як працюють установки для електрохімічної розмірної обробки?
2. Як класифікуються установки для електрохімічної розмірної обробки?
3. Як виконуються операції анодного полірування та травлення?
4. У чому полягає відмінність між без трафаретним та трафаретним електрохімічним маркуванням?
5. На чому базується принцип роботи установок для розмірної електрохіміко-гідравлічної установки?
6. Наведіть приклади та поясніть принцип роботи установок для розмірної електрохіміко-гідравлічної обробки шляхом різання.
7. У чому полягає особливість роботи установок для виконання копіювально-прошивних операцій?
8. У чому полягає особливість роботи установок для виконання токарних і фрезерних робіт?
9. На чому базується принцип роботи установок для розмірної електрохіміко-механічної обробки?

10. Поясніть особливості роботи установок для чистової анодно-механічної обробки.

11. У чому полягає відмінність у роботі установок для електроабразивної та електроалмазної обробок?

12. Поясніть особливості роботи установок для чорнкової анодно-механічної обробки.

13. Які типові зразки установок для електрохімічної розмірної обробки Ви знаєте?

14. Дайте характеристику установок для електрохімічної розмірної обробки як приймачів електричної енергії.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

### Базовий

1. Соловей О. І. Промислові електротехнологічні установки: навч. посібник / О. І. Соловей. – Київ : Кондор, 2009. – 172 с.
2. Милосердов В. О. Електротехнологічні установки та пристрої: навч. посібник / В. О. Милосердов. – Вінниця : 2007. – 135 с.
3. Василега П. О. Електротехнологічні установки : навч. посібник / П. О. Василега. – Суми : Видавництво СумДУ. – 2010. – 548 с.
4. Электротермические установки : учеб. пособие / Б. А. Сокунов, Л. С. Грובה. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 122 с.
5. Гушин С. Н. Теоретические основы энерготехнологических процессов цветной металлургии: Учебник для вузов / С. Н. Гушин, Н. Г. Агеев, Ю. В. Крючков. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2000. – 312 с. ил.
6. Макаров Ф. К. Промышленные электротехнологические установки / Ф. К. Макаров, С. А. Сбитнев, М. Н. Староверов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2003. – 250 с.
7. Авдеев В. А. Основы проектирования металлургических заводов / В. А. Авдеев, Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 190 с.
8. Минеев А. Р. Моделирование электротехнологических процессов и установок / А. Р. Минеев, А. И. Коробов, М. Я. Погребисский. – М. : Спутник, 2004.
9. Минеев А. Р. Электроснабжение и оптимизация потребления энергии электротехнологическими установками / А. Р. Минеев, М. Г. Кузьмин, Р. В. Минеев. – Новосибирск : изд. НГТУ, – 2008. – 175 с.
10. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник / Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2005. – 200 с.

### Допоміжний

11. Материаловедение и технология металлов : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. [2-е, исправ.] / М. Г. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Митюнин и др. – М. : Высшая школа, 2000. – 638 с.
12. Сарапулов Ф. Н. Введение в специальность «Электротехнологические установки и системы» : учеб. пособие / Ф. Н. Сарапулов : Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 1997. – 92 с.
13. Электротехнологические промышленные установки / под. ред. А. Д. Савченко. – М. : Энергия, 1982. – 400 с.
14. Болотов А. В. Электротехнологические установки / А. В. Болотов – М. : Высш. Шк., 1988. – 336 с.
15. Бирюков Б. Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. – М. : Машиностроение, 1981. – 172 с.

*Навчальне видання*

**ПАВЛЕНКО** Тетяна Павлівна,  
**ПЕТРЕНКО** Олександр Миколайович,  
**ЛУКАШОВА** Наталя Павлівна

## **ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для магістрів усіх форм навчання за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

Редактор *В. І. Шалда*

Комп'ютерне верстання *Н. П. Лукашова*

План 2018, поз. 2006 Л

---

Підп. до друку 07.05.2018. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 6,8

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.