

**В. І. Савуляк, С. А. Заболотний**

# **ЗВАРЮВАННЯ**

**ВСТУП ДО ФАХУ**



**Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет**

**В. І. Савуляк, С. А. Заболотний**

**ЗВАРЮВАННЯ  
ВСТУП ДО ФАХУ**

**Навчальний посібник**

**Вінниця  
ВНТУ  
2015**

УДК 621.791(075)  
ББК 30.616я73  
С13

Автори:

**В. І. Савуляк, С. А. Заболотний**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Зварювання». Лист № 1/11-19747 від 15.12.2014 р.

Рецензенти:

**О. В. Диха**, доктор технічних наук, професор

**А. П. Поляков**, доктор технічних наук, професор

**В. А. Матвійчук**, доктор технічних наук, професор

**Савуляк, В. І.**

**С13** Зварювання. Вступ до фаху : навчальний посібник / В. І. Савуляк, С. А. Заболотний – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 136 с.

ISBN 978-966-641-610-3

В навчальному посібнику розглянуто короткий огляд історії виникнення та розвитку зварювання як окремого самостійного методу створення нероз'ємних з'єднань машин і конструкцій. Описано та зроблено порівняльні характеристики видів зварювання, суміжних з ними технологій відновлення деталей і конструкцій.

Посібник розрахований для студентів технічних спеціальностей.

**УДК 621.791(075)**

**ББК 30.616я73**

**ISBN 978-966-641-610-3**

© В. Савуляк, С. Заболотний, 2015

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ТЕМА 1 СУТНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ.....	8
1.1 Утворення міжатомних зв'язків під час зварювання.....	8
1.2 Особливості формування хімічного складу металу шва.....	12
1.3 Кристалічна будова зварного з'єднання.....	13
1.4 Напруження і деформації під час зварювання.....	17
ТЕМА 2 З ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ ЗВАРЮВАННЯ.....	19
2.1 Зварювання в давнину.....	19
2.2 Винайдення зварювання та його розвиток.....	23
2.3 Розробка процесу контактного електрозварювання.....	28
2.4 Розробка процесу газового зварювання.....	31
2.5 Зварювання в роки Другої світової війни.....	35
ТЕМА 3 ОСНОВНІ ВИДИ ЗВАРЮВАННЯ.....	39
3.1 Класифікація видів зварювання.....	39
3.2 Електричне дугове зварювання.....	40
3.2.1 Електрична дуга та її властивості.....	42
3.2.2 Джерела живлення зварювальної дуги.....	46
3.2.3 Ручне дугове зварювання покритими електродами.....	48
3.2.4 Автоматичне зварювання під флюсом.....	52
3.2.5 Автоматичне зварювання.....	55
3.2.6 Зварювання у вуглекислому газі.....	59
3.2.7 Плазмове зварювання.....	61
3.3 Електрошлакове зварювання.....	65
3.4 Зварювання електронним променем.....	68
3.5 Зварювання лазером.....	73
3.6 Контактне зварювання.....	74
3.6.1 Точкове зварювання.....	74
3.6.2 Шовне зварювання.....	77
3.6.3 Рельєфне зварювання.....	79
3.6.4 Стикове зварювання.....	80
3.7 Зварювання струмами високої частоти.....	83
3.8 Холодне зварювання.....	86
3.9 Зварювання вибухом.....	88
3.10 Магнітно-імпульсне зварювання.....	90
3.11 Зварювання тертям.....	92
3.12 Ультразвукове зварювання.....	95
3.13 Зварювання прокатуванням.....	97
3.14 Дифузійне зварювання.....	99
3.15 Паяння.....	103
ТЕМА 4 ЗВАРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН І КОНСТРУКЦІЙ.....	108

4.1 Наплавлювання функціональних покриттів.....	110
4.1.1 Технології наплавлювання .....	112
4.1.2 Наплавлювання під шаром флюсу.....	113
4.1.3 Налавлення в середовищі захисних газів.....	114
4.1.4 Вібродугове наплавлювання .....	115
4.1.5 Електрошлакове наплавлювання (ЕШН).....	116
4.1.6 Плазмове наплавлювання .....	117
4.1.7 Індукційне наплавлювання.....	118
4.1.8 Наплавлювання заморожуванням.....	119
4.2 Газополуменеве нанесення порошкових матеріалів.....	120
4.3 Металізація.....	122
4.4 Відновлення деталей наплавлюванням вибухом .....	123
4.5 Детонаційне нанесення порошкових покриттів .....	124
ТЕМА 5 ДЕФЕКТИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ І МЕТОДИ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ.....	125
5.1 Основні види контролю зварних з'єднань.....	130
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	134

## ВСТУП

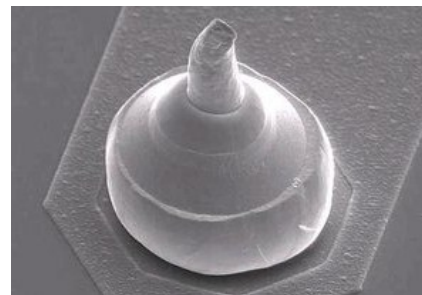
Зварювання належить до числа великих винаходів. Воно докорінно змінило суть багатьох технологічних процесів виробництва машин і механізмів, будівництва суден і споруд, відіграє важливу роль в освоєнні космосу.

Зварювання зіграло важливу роль на усіх етапах розвитку виробництва у світі, індустріалізації нашої країни. В даний час зварювання перетворилось на великий самостійний вид виробництва. Воно застосовується для створення і зведення принципово нових конструкцій і споруд, для ремонту машин і апаратів, для отримання виробів зі спеціальними властивостями. Зварні конструкції працюють при надвисоких і наднизьких температурах, з тисками, що значно перевищують атмосферний, і в умовах космічного вакууму. Сучасні досягнення в галузі зварювання дозволяють з'єднувати не тільки метали, а й пластмаси, скло, кераміку та інші матеріали. При цьому елементи, що зварюються, можуть мати розміри від декількох мікрон (у радіоелектроніці) до десятків метрів (у машинобудуванні і будівництві) (рис. 1, 2).

Зварювання використовують і для створення художніх виробів (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 1 – Приклади зварних конструкцій: а) – автомобіль для перевезення пального; б) – контакт мікропроцесора (Ø 50 мкм)

Зварювання виконують на повітрі, під водою, у вакуумі. Льотчики-космонавти Г. Шонін і В. Кубасов на борту космічної станції "Союз-6" вперше в світі здійснили зварювання в умовах космічного вакууму і невагомості. Космонавтами В. Джанібековим і С. Савицькою під час польоту станції "Союз-7" у відкритому космосі протягом трьох годин



проводилося зварювання, різання та паяння металів, що показало можливість виконання різних ремонтних робіт космічних апаратів.



Рисунок 2 – Приклади зварних елементів



Рисунок 3 – Художні вироби, виготовлені методами зварювання

До сфери зварювальних технологій відносять також різання металів; наплавлення одного металу на інший; напилювання і металізацію (рис. 4, 5). Паяння, хоча і відрізняється за своєю природою від зварювання, також традиційно належить до зварювальних технологій.



Рисунок 4 – Зварювальний робот



Рисунок 5 – Напилювання покриттів

Коло проблем, які охоплюються нині зварюванням, вимагає великих знань в таких галузях знань, як матеріалознавство, фізична хімія, фізика високих енергій, квантова механіка, обчислювальна техніка та ін. Можна стверджувати, що зварювання в ланцюзі незупинного технічного прогресу є його істотною ланкою. Видалення з технологій сучасного виробництва зварювання та генерованих ним суміжних процесів призведе до зупинки усього сучасного виробництва без винятків. Створення і застосування все нових і нових матеріалів, які необхідні для розробки та вдосконалення

машин і механізмів, вимагає відповідних нових технологій виготовлення з них деталей та складання вузлів. І тут без зварювання зовсім не обійтися.

Надзвичайно широкі можливості зварювання та народжених ним суміжних технологій забезпечують широке ефективне застосування цих методів на всіх етапах життєвого циклу машин та інших конструкцій: виготовлення, сервіс (з ремонтом включно), утилізація. Зварювання металів і неметалів, живих тканин, кісток, безсумнівно, має необмежені перспективи, вважає академік Б. Є. Патон, український вчений зі світовим ім'ям.



## ТЕМА 1 СУТНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ

Протягом усього періоду існування людини на Землі – в тому числі, в кам'яній, бронзовій і залізній добі – їй доводилося вирішувати завдання з'єднання між собою двох або більше окремих частин в єдиний монолітний виріб, тобто отримувати нероз'ємні з'єднання. З розвитком суспільства і створенням нових конструкційних матеріалів зі спеціальними властивостями проблема отримання зварних з'єднань з властивостями, близькими до властивостей цих матеріалів, ставала все більш складною та актуальною.

Конструкційні матеріали складаються з атомів (іонів), що знаходяться у взаємодії. Фізико-механічні характеристики твердих тіл визначаються розташуванням атомів (іонів) і зв'язками, що діють між ними.

Всі тверді тіла чинять опір як деформації розтягу, так і деформації стиску. Отже, між частинками твердого тіла діють як сили притягування, так і сили відштовхування. На певній відстані між частинками ці сили врівноважують одна одну, що і відповідає рівноважному стану кристала. Теорія і досвід показують, що сили притягування між частинками твердого тіла проявляються вже на таких відстанях, при яких сили відштовхування ще дуже малі. Ті й інші сили зростають зі зменшенням відстані між частинками, але сили притягування зростають значно повільніше, ніж сили відштовхування.

При затвердінні металів атоми зближуються на відстань 0,0002...0,0003 мкм. Валентні електрони отримують можливість переходити від одного атома до іншого, досить вільно переміщуючись по всьому об'єму металу. Тому валентні електрони прийнято називати "колективізованими", а зв'язок, який існує між іонами, – металевим. Металевий зв'язок можна уявити як зв'язок, що виникає за рахунок притягування між ґратками з позитивно зарядженими іонами і оточуючими їх "колективізованими" електронами, що їх оточують і стягують атоми.

### 1.1 Утворення міжатомних зв'язків під час зварювання

Для того, щоб зварне з'єднання мало такі ж властивості, що і зварювані матеріали, необхідно в зоні з'єднання (між поверхнями, що зварюються) сформувати таку ж взаємодію між атомами, як і в матеріалах конструкції.

Для пояснення процесу утворення зварного з'єднання розглянемо схематично випадок з'єднання двох монокристалів з ідеально чистими і ідеально рівними поверхнями (рис. 1.1). З'єднання таких монокристалів (стан "а") в єдине ціле (стан "б") відбудеться, якщо зблизити їх поверхні на відстань, що дорівнює або близька за значенням величині параметра кристалічної ґратки (відстані між атомами у твердому тілі) – 0,0002...0,0003 мкм.

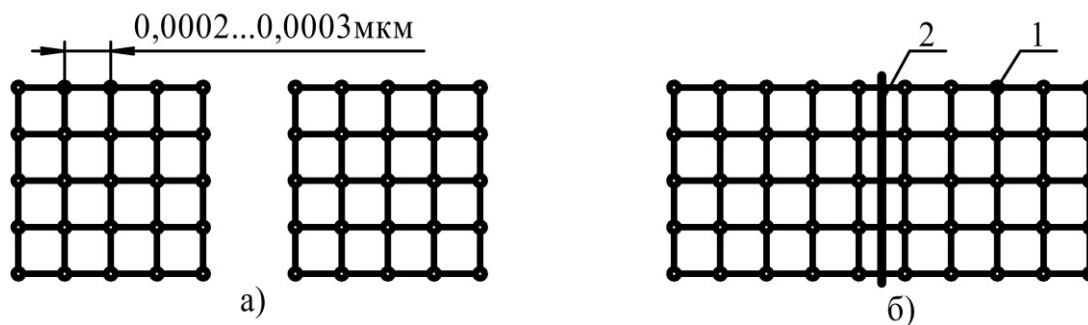


Рисунок 1.1 – Схема утворення зварного з'єднання між двома монокристалами: а) – монокристали до зварювання; б) – монокристали після зварювання; 1 – іон кристалічної ґратки; 2 – границя зварного з'єднання

Зварювання реальних твердих тіл ускладнюється рядом факторів. Реальні тіла – полікристалічні. Вони не мають ідеально чистих і ідеально гладких поверхонь.

Після механічної обробки на поверхні металів є макроскопічна і мікроскопічна геометричні неоднорідності – хвилястість і шорсткість відповідно. Мікровиступи розташовуються на хвилястій поверхні, крок якої може складати від 1000 до 10000 мкм, а висота мікровиступів від часток (після шліфування) до десятків мікрометрів (після токарної та фрезерної обробки), що на кілька порядків більше параметра кристалічної ґратки.

При зближенні таких поверхонь їх контактування відбудеться не по всій поверхні, а лише в окремих точках (рис. 1.2).

Завдання з'єднання реальних поверхонь металів в одне ціле значно ускладнюється і наявністю на контактних поверхнях крім мікровиступів оксидів, адсорбованих газів, вологи, органічних (жирових) забруднень.

Утворення металевих зв'язків можливе за умови видалення з контактних поверхонь забруднень (найбільш міцними з яких є оксиди) і

забезпечення суцільності фізичного контакту, тобто зближення зварюваних поверхонь на міжатомну відстань по всій поверхні з'єднання.

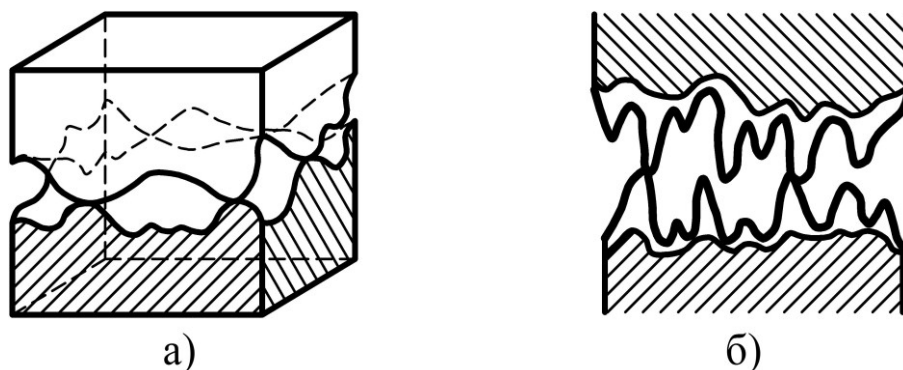


Рисунок 1.2 – Модель контакту твердих тіл по макроскопічній хвилястості (а) і мікроскопічній шорсткості (б) поверхонь

При всіх способах зварювання з'єднувані поверхні попередньо піддають обробці, яка забезпечує видалення поверхневих забруднень і певну геометрію поверхні.

Але в атмосфері повітря на очищених поверхнях вже за  $2,4 \cdot 10^{-9}$  секунди утворюється мономолекулярний шар газу, тому, як би не очищали поверхні металу перед зварюванням, вони завжди виявляються покритими шаром оксидів та газів.

Найменшу висоту мікрориступів на зварюваних поверхнях забезпечує їх особливо чистове полірування, але і після такої трудомісткої обробки висота мікрориступів в сотні разів більша параметра кристалічної ґратки. Тому утворення зварного з'єднання (зближення зварюваних поверхонь, видалення оксидів і утворення металевих зв'язків) може відбуватися в процесі їх стискання, пластичної деформації поверхонь, що зварюються, під дією прикладених сил (тиску), або в процесі їх оплавлення з наступним самовільним утворенням спільної зварювальної ванни.

Звідси всі способи зварювання можна умовно розділити на зварювання тиском і зварювання плавленням.

Зварювання тиском може здійснюватися без підігрівання (холодне зварювання) і з підігріванням. При холодному зварюванні необхідна деформація більше 90%, в процесі якої відбувається зминання мікрориступів на поверхнях і руйнування оксидних плівок (рис. 1.3). Підігрівання полегшує процес зварювання, і з'єднання відбувається при значно меншій деформації.

У розплавленому металі існують певні зв'язки між атомами (іонами). Є вони і на утворених під час плавлення крайках міжфазних границь твердий метал – рідкий. Тому для формування безперервного міжатомного зв'язку досить утворення спільної зварювальної ванни і, як наслідок, зникнення границі між поверхнями, що з'єднуються.

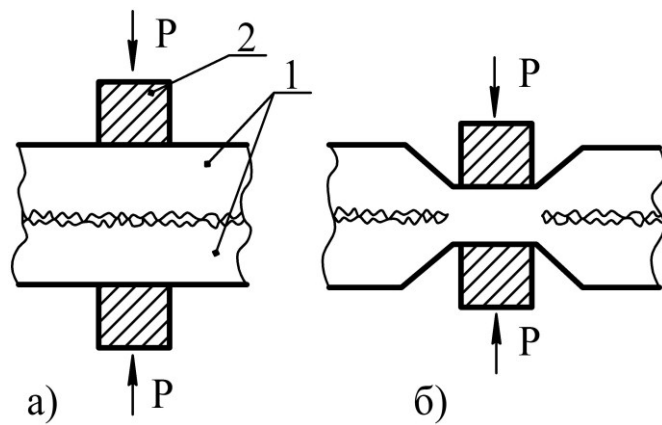


Рисунок 1.3 – Схема зварювання пластин тиском

Формуванню зварного з'єднання можуть перешкоджати поверхневі забруднення, насамперед оксиди. При цьому оксиди можуть розчинятися в зварювальній ванні (наприклад, при зварюванні сталей, титану та ін.) і приводити до забруднення зварного шва киснем. Якщо ж оксиди тугоплавкі і нерозчинні в рідкому металі, то вони перешкоджають сплавленню металу і утворенню загальної зварювальної ванни (наприклад, при зварюванні алюмінію) та забруднюють шов включеннями. У цьому випадку вишуковують прийоми, що забезпечують руйнування та видалення оксидів зі шва на поверхню.

Таким чином, процес зварювання слід розглядати як сукупність технологічних прийомів (розплавлення зварюваних поверхонь з утворенням зварювальної ванни, нагрів і деформація зварюваних заготовок тощо), спрямованих на вирішення завдання встановлення міжатомних зв'язків на границях розділу заготовок, що з'єднуються.

Слід зазначити, що утворення металевих зв'язків між зварюваними поверхнями, хоча і є основним і необхідним етапом формування з'єднання, все ж ще не визначає кінцеві властивості отриманих зварних з'єднань. Останні залежать від цілого ряду процесів, які є супутніми під час утворення міжатомних зв'язків – процесів, які ведуть до зміни в зоні зварного з'єднання будови кристалів, хімічного складу, до формування внутрішніх напружень та розвитку деформацій.

Найбільші відхилення властивостей зварного з'єднання від властивостей основного металу спостерігаються при зварюванні плавленням, оскільки в цьому випадку метал нагрівається, по-перше,

нерівномірно по всьому об'єму зварюваних заготовок і, по-друге, до найбільш високої температури – температури плавлення.

При зварюванні тиском також можуть відбуватися зміни кристалічної будови заготовок, оскільки метал може нагріватися вище температури початку зміни кристалічної будови матеріалів, але ці зміни не настільки істотні, як при зварюванні плавленням.

Тому при розгляді процесу утворення зварного з'єднання в умовах зварювання плавленням слід вивчати:

- зміни хімічного складу металу шва;
- формування структури зварного з'єднання;
- утворення внутрішніх (зварювальних) напружень, що виникають при нерівномірному нагріванні й здатних викликати деформації зварних конструкцій і навіть руйнування зварного з'єднання.

## **1.2 Особливості формування хімічного складу металу шва**

Хімічний склад металу шва визначається хімічним складом металу, що зварюється, електродного (присадного) дроту та фізико-хімічними процесами, що протікають в зварювальній ванні.

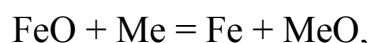
В умовах високої температури електричної дуги і металу зварювальної ванни відбувається дисоціація молекул газів – кисню, азоту, водню і хімічних сполук – вуглекислого газу і парів води з утворенням атомарного кисню, азоту, водню і вуглецю, які стають вельми активними і реагують з металом.

Так, при зварюванні сталей кисень, що взаємодіє з залізом, утворює оксиди  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Найбільш небезпечним для якості шва є оксид  $\text{FeO}$ , здатний розчинятися в рідкому металі. Після охолодження шва, зважаючи на високі температури затвердіння,  $\text{FeO}$  залишається в ньому у вигляді виділень по границях зерен, що сильно знижує пластичність шва. Чим більше кисню в шві знаходиться у вигляді  $\text{FeO}$ , тим гірші його механічні властивості. Вищі оксиди  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  не розчиняються в рідкому металі і спливають на поверхню зварювальної ванни у вигляді шлаку.

Крім заліза окислюються й інші легувальні елементи сталі. Окислення цих елементів призводить до зменшення їх вмісту в металі шва. Крім того, утворені оксиди можуть залишатися у шві у вигляді різних включень або пор, що значно знижує механічні властивості зварних з'єднань.

Тому однією з умов отримання якісного металу шва є попередження його окислення, в першу чергу, шляхом створення різних захисних середовищ.

Однак застосовувані при зварюванні захисні заходи не завжди забезпечують відсутність окислення розплавленого металу. У цьому випадку метал шва потрібно розкислити. Розкисленням називають процес відновлення заліза з його оксиду та переведення кисню у форму нерозчинних сполук з подальшим видаленням їх в шлак. У загальному випадку реакція розкислення має вигляд:



де Me – розкислювач.

Розкислювачем є елемент, що має в умовах зварювання більшу спорідненість з киснем, ніж залізо. Як розкислювачі застосовують кремній, марганець, титан, алюміній. Розкислювачі вводять в зварювальну ванну через електродний дріт, покриття електродів, флюси.

Азот повітря, потрапляючи в стовп дуги, дисоціює і, перебуваючи в атомарному стані, розчиняється в рідкому металі. У процесі охолодження азот випадає з розчину і взаємодіє з залізом, утворюючи нітриди –  $\text{Fe}_2\text{N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Вміст азоту в металі шва шкідливо впливає на його механічні властивості, особливо пластичність. Крім того, насичення металу азотом сприяє утворенню газових пор.

Водень в зону зварювання потрапляє з вологи, що може бути в покритті електрода або флюсі, іржі на поверхні зварювального дроту та деталі, з повітря. Атомарний водень добре розчиняється в рідкому металі. При охолодженні і, особливо, кристалізації зварювальної ванни розчинність водню різко (стрибкоподібно) зменшується.

Водень, що виділився, не встигає повністю видалитися з металу шва. Це призводить до утворення газових пор. Крім того, атоми водню дифундують в наявні порожнини, призводять до підвищення в них тиску, розвитку в металі внутрішніх напружень і утворення мікротріщин.

### **1.3 Кристалічна будова зварного з'єднання**

Зварне з'єднання (рис. 1.4) складається зі зварного шва 1, що утворюється в результаті кристалізації зварювальної ванни; зони



сплавлення 2, в якій метал при нагріванні перебував у твердо-рідкому стані, і зони термічного впливу 3, що є частиною основного металу, який піддавався тепловому впливу, що зумовив зміну структури і властивостей.

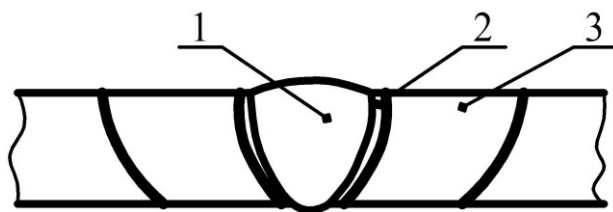


Рисунок 1.4 – Схема будови зварного з'єднання: 1 – зварний шов;  
2 – зона сплавлення, 3 – зона термічного впливу

Зварний шов має кристалічну будову литого металу, яка сформувалася в результаті розвитку первинної та вторинної кристалізації.

Первинною кристалізацією називають перехід металу з рідкого стану в твердий, в результаті чого утворюються кристаліти (зерна). Процес первинної кристалізації починається на частково оплавлених зернах основного металу, що знаходяться на дні зварювальної ванни. При багатошаровому зварюванні центрами кристалізації є поверхні кристалітів попереднього шару. Зростання кристалітів відбувається в результаті приєднання до їх поверхні окремих частинок (атомів) з навколишнього розплаву. Кожен кристаліт, зростаючи від окремого зерна на границі сплавлення, являє собою групу спільно зростаючих елементарних стовпчастих кристалів, зрощених із загальною основою, тобто з оплавленим зерном основного металу.

Залежно від форми і розташування кристалітів затверділого металу розрізняють зернисту, стовпчасту і дендритну структури.

При зернистій структурі зерна не мають певної орієнтації, а за формою нагадують багатогранники. Така структура, зазвичай, характерна для металу шва, виконаного покритими електродами, при його досить швидкому охолодженні. При стовпчастій і дендритних структурах зерна витягнуті в одному напрямку. У стовпчастій структурі вони мають компактну форму, а в дендритній – гіллясту. Такі структури шов має при повільному охолодженні – при зварюванні під флюсом і електрошлаковому зварюванні.

Напрямок росту кристалів пов'язаний з інтенсивністю відведення тепла

від ванни рідкого металу. Кристали ростуть перпендикулярно до границі сплавлення в напрямку, протилежному відведенню теплоти (рис. 1.5).

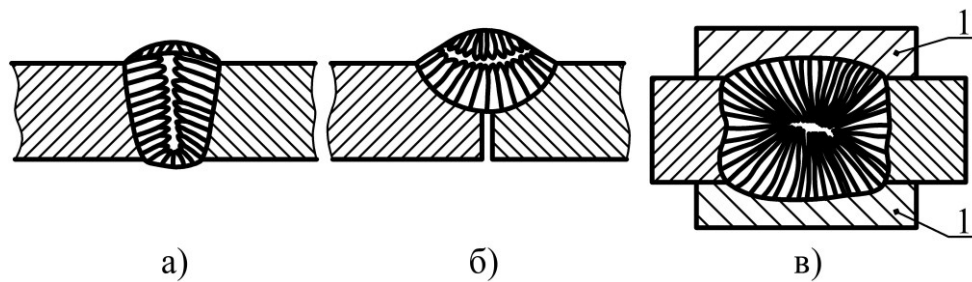


Рисунок 1.5 – Схеми напрямку росту кристалітів під час утворення шва: а) – з глибоким проваром; б) – широкого; в) – електрошлакового; 1 – мідні повзуни для охолодження

Під час зварювання сталей спочатку утворюються кристаліти однієї будови, але в процесі охолодження відбуваються перетворення, які супроводжуються зміною будови металу за рахунок появи нових утворень на границях первинних стовпчастих кристалітів. Таке явище називається вторинною кристалізацією або перекристалізацією.

Під час зварювання низьковуглецевої сталі в навколошовній зоні розрізняють такі ділянки (рис. 1.6): сплавлення, перегріву, нормалізації, неповної перекристалізації і рекристалізації. Далі йде основний метал, що не піддавався впливу високих температур.

Зона сплавлення (ділянка неповного розплавлення) безпосередньо примикає до зварного шва. На цій ділянці і відбувається зварювання. Ширина її залежить від джерела нагрівання і режиму зварювання та становить біля 0,1...0,4 мм.

Ділянка перегріву. На цій ділянці, де метал був нагрітий приблизно від 1100 °С до температури початку плавлення основного металу, розвивається крупне зерно, що призводить до утворення голчатої (відманштетової) структури. Механічні властивості на ділянці перегріву знижені. Ширина її змінюється в межах 1...3 мм.

Ділянка нормалізації (перекристалізації) охоплює частину основного металу, нагрітого до температур 900...1100 °С. На цій ділянці створюються сприятливі умови для утворення дрібнозернистої вторинної структури, внаслідок чого її механічні властивості звичайно вище механічних властивостей основного металу, що не піддавався нормалізації. Ширина ділянки знаходиться в межах 1,2...4 мм.

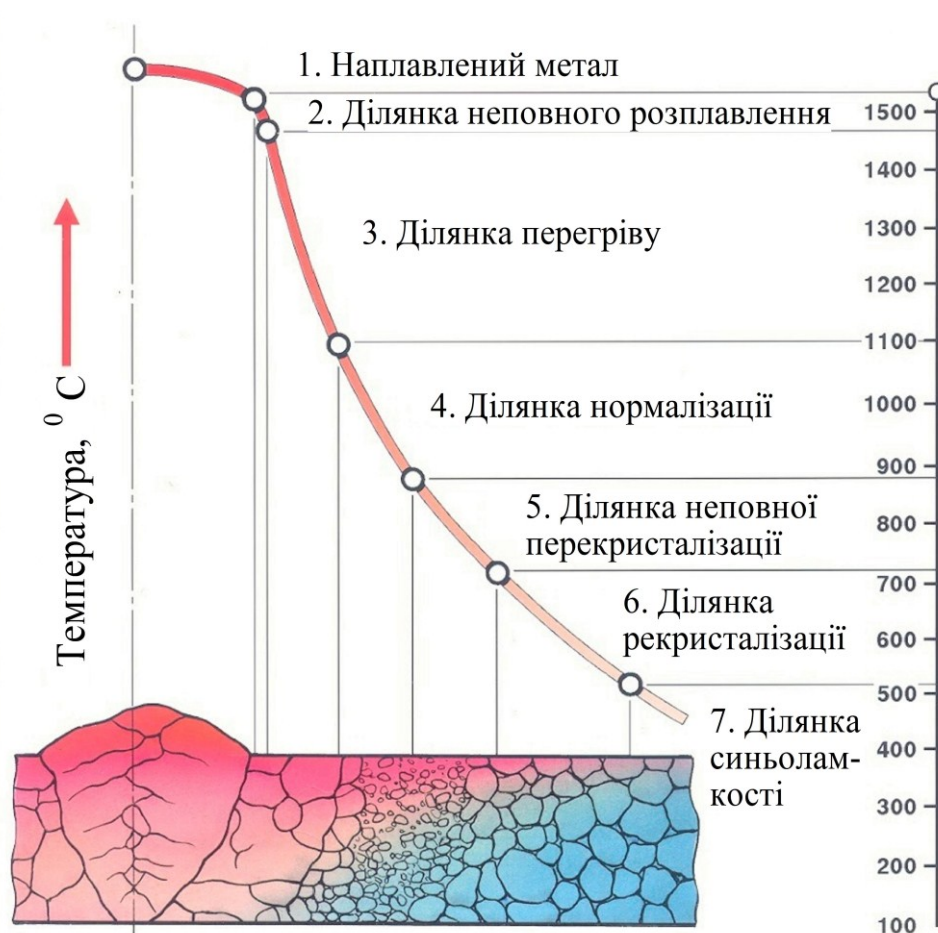


Рисунок 1.6 – Кристалічна будова навколоколошовної зони під час зварювання низьковуглецевої сталі

Ділянка неповної перекристалізації містить в собі метал, який нагрітий до 720...900 °С і піддавався тільки частковій перекристалізації через нестачу теплоти для перекристалізації і подрібнення всіх зерен. Тому тут поряд з досить великими зернами основного металу, що не змінилися під час нагрівання, є дрібні зерна, що утворилися в результаті перекристалізації. Механічні властивості такої змішаної структури невисокі.

Ділянка рекристалізації спостерігається при зварюванні сталей, які піддавалися раніше пластичним деформаціям (прокатуванню, куванню, наклепуванню), в результаті яких частина зерен основного металу сплющилася і витягнулася, а частина роздрібнилася. На даній ділянці метал був нагрітий до 500...720 °С, що викликало його рекристалізацію, сутність якої полягає в тому, що з уламків зерен зароджуються і ростуть нові зерна, розмір яких значно збільшується.

При зварюванні металу, що не піддавався пластичній деформації (наприклад, литих деталей), процесу рекристалізації і відповідної ділянки не спостерігається.

Загальна ширина зони термічного впливу залежить від виду, способу і режиму зварювання.

Вид зварювання	Ширина зони термічного впливу, мм
Ручне дугове	3 - 6
В захисних газах	1 - 3
Під флюсом	2 - 4
Електрошлакове	11 - 14
Газове	20 - 30

#### **1.4 Напруження і деформації під час зварювання**

У процесі виготовлення зварних конструкцій у них виникають зварювальні напруження і деформації. Зварювальні напруження, що перевищують певну межу, викликають пластичну деформацію металу, що призводить до зміни розмірів і форми виробу, тобто до його викривлення. Якщо зварювальні напруження перевищують межу міцності, то відбувається руйнування зварного шва або з'єднання, тобто утворюються тріщини. Причинами виникнення зварювальних напружень і деформацій є нерівномірне нагрівання металу під час зварювання, ливарне усідання розплавленого металу і структурні перетворення в металі в процесі його охолодження.

Всі метали під час нагрівання розширюються, а при охолодженні стискаються. За наявності жорстких зв'язків між нагрітими і холодними ділянками металу це призводить до утворення стискальних або розтягувальних внутрішніх зварювальних напружень. Ця зміна розмірів залежить від коефіцієнта лінійного розширення даного металу, довжини нагрітої зони, а також температури її нагрівання.

Під час зварювання відбуваються поздовжня і поперечна усадки розплавленого металу, в результаті чого утворюються поздовжні і поперечні внутрішні напруження, що викликають деформації зварних виробів. В результаті поздовжньої усадки виникає викривлення виробів в

поздовжньому напрямку, а поперечна, як правило, призводить до кутових деформацій, тобто до викривлення в бік більшого об'єму розплавленого металу (рис. 1.7). При зварюванні легованих і високовуглецевих сталей поряд з тепловими виникають об'ємні структурні напруження. Пояснюється це тим, що при охолодженні змінюється структура металу (розміри і взаємне розташування його зерен), що супроводжується зміною об'єму металу та виникненням внутрішніх напружень. При зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих незагартованих сталей структурні напруження дуже малі і виникають рідко.

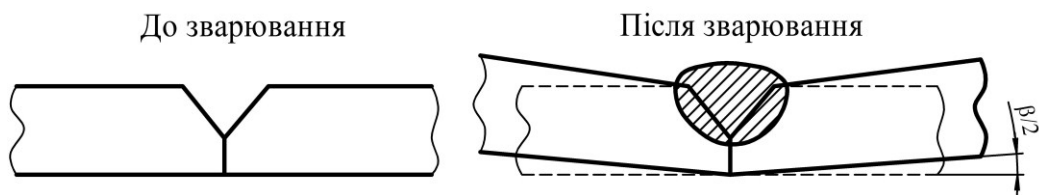


Рисунок 1.7 – Кутові деформації зварних виробів від поперечного усідання наплавленого металу

Ще складніші процеси протікають при зварюванні різнорідних металів. Основними труднощами, що виникають при цьому, можуть бути металургійна несумісність, тобто відмінності в структурі, а також відмінності в коефіцієнтах лінійного розширення, тепло- і електропровідності.

## ТЕМА 2 З ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ ЗВАРЮВАННЯ

### 2.1 Зварювання в давнину

З надр кам'яного століття беруть початок багато досягнень людства, в тому числі і в сфері зварювальних технологій. Ще в глибоку давнину за допомогою кам'яного знаряддя з самородків золота, срібла, міді можна було обковувати пластинки, гострі леза, шкребки і т. п., які для збільшення їх розмірів з'єднували між собою. Завдаючи ударів по складених разом шматках металу, вдавалося досягти їх з'єднання. А це був вже один з видів зварювання – зварювання в холодному стані шляхом деформування. Спосіб холодного зварювання удосконалюється до цих пір і знаходить ефективно застосування в наш час.

За кілька тисячоліть до нашої ери деякі племена навчилися видобувати з руди мідь. Але техніку лиття вони ще не опанували і, щоб виготовити великий виріб з міді, їм доводилося вдаватися до зварювання окремих підігрітих шматків металу. Підігрівання металу до пластичного стану полегшувало схоплювання, а процес з'єднання нагадував кування. Тому він і називається ковальським зварюванням.

Поява нового матеріалу – бронзи – змусила древніх умільців взятися за розробку нових методів зварювання. Справа в тому, що бронза мала більш високу міцність, твердість, опір стиранню в порівнянні з міддю. Однак її пластичність була значно нижчою пластичності міді. Тому зварювання бронзи методом пластичної деформації, навіть з підігрівом, не забезпечувало утворення з'єднання. Ймовірно, стародавні майстри не раз спостерігали, як перегріті крапельки розплавленої бронзи, потрапляючи на бронзові пластини, іноді міцно "схоплювалися" з ними. Ось цією властивістю – схоплюватися, приварюватися – і скористався невідомий винахідник ливарного зварювання, сутність якого полягала в тому, що зазор між заготовками заповнювався розплавленим металом і деформування зварного з'єднання відбувалося в твердо-рідкому стані. Цим способом, ймовірно, були виготовлені бронзові посудини висотою 310 мм з товщиною стінок всього 0,5...0,7 мм в Стародавній Греції.

У III...II тисячоліттях до н. е. в різних районах земної кулі почали отримувати залізо. При цьому в деяких випадках маса виробів набагато перевищувала ту кількість металу, яку можна було отримати за одне плавлення за існуючою тоді технологією. Найбільш яскравим прикладом є



знаменитий пам'ятник в Індії – колона, виконана з вельми чистого заліза (99,97% Fe).

Колона важить близько 6,5 тонни, має висоту 7,3 м при діаметрах біля основи 416 мм, а зверху – 295 мм, і належить вона до 415 р. н. е. Але аж до початку XIX століття не було відомо способів отримання температур, достатніх для розплавлення заліза і лиття виробів з нього. Горіння звичайної деревини створює температуру 1000...1100 °С, достатню для плавлення міді та її сплавів. Але щоб виплавити чисте залізо, потрібна температура порядку 1550 °С. Не було печей і методів створення такої температури, причому знадобляться тисячоліття, перш ніж з'являться технічні можливості її досягнення.

Однією з гіпотез, що пояснює створення цієї колони, є застосування кричного методу отримання заліза з наступним куванням заготовок (ковальським зварюванням криць) в нагрітому стані. Спочатку в горнах при температурах порядку 1000 °С відновленням залізної руди деревним вугіллям отримували крицю, що має вигляд губчастої маси і складається із зерен чистого заліза і шлаку. А потім крицю неодноразово проковували в нагрітому стані. При цьому окремі частинки заліза з'єднувалися-зварювалися, утворюючи щільний метал. Таке залізо називали звареним.

Для того, щоб збільшити масу металу, окремі заготовки розігрівали до білого стану, складали разом і проковували. Без ковальського зварювання залізний вік початися не міг. Високої майстерності досягли ковалі-зварники у виготовленні знарядь праці і зброї (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Мечі вікінгів (ковальське зварювання)

Безліч залізних мечів зберігається в різних музеях світу. Дивовижні за

своєю конструкцією мечі I–XI ст., знайдені на місцях колишніх римських фортець, підняті із затонулих кораблів. Клинки мечів неоднорідні по товщині і складаються з шарів, що чергуються в певній послідовності, із твердої сталі і м'якого заліза. Такі мечі мали високу міцність і до того ж мали властивість самозагострюватися.

Сучасними методами металографії встановлено, що один з клинків мав одинадцять шарів. Така робота вимагала володіння всіма премудростями ковальського зварювання, величезного досвіду, інтуїції (про науку говорити було ще рано). Багатошарові тонкі клинки з диференційованими властивостями можна вважати вершиною ковальського зварювання. В античні часи високого економічного і суспільного розвитку досягла Еллада. Ковальське ремесло було в такій пошані, що, відповідно до грецької міфології, їм не погребував займатися один з олімпійських богів – Гефест, покровитель мистецтв і ремесел. У залізному віці використовувалася і така технологія отримання нероз'ємних з'єднань, як паяння.

Рано чи пізно древні ювеліри повинні були виявити, що для з'єднання металів і сплавів методом заливання можна застосовувати такі сплави, які плавляться при меншій температурі, ніж основний метал, що з'єднується. Так, варто було тільки в золото додати мідь або срібло, як утворювався сплав з меншою, ніж у вихідних компонентів, температурою плавлення.

Через тисячі років металознавці дослідять вплив складів сплавів на температуру їх плавлення, накреслять діаграми стану всіляких комбінацій металів і, зокрема, встановлять, що сплав 20% золота і 80% міді плавиться при температурі 886 °С (тоді як температура плавлення технічно чистого золота 1064 °С, а міді – 1083 °С), сплав 70% срібла з 30% міді плавиться при 780 °С (температура плавлення чистого срібла 961 °С). Цю властивість сплавів і було використано для паяння.

Ще в єгипетських пірамідах археологи неодноразово знаходили предмети з золота і срібла, спаяні оловом. А у Помпеї, загиблої при виверженні Везувію, були виявлені свинцеві водопровідні труби, спаяні поздовжнім швом. Багато золотих прикрас і предметів побуту, знайдені в скіфських курганах, зроблені за допомогою паяння (рис. 2.2).

Своєю вражаючою красою шедеври древнього мистецтва зобов'язані не тільки таланту художників, а й майстерності умільців, які здійснювали паяння. Причому на багатьох виробках навіть неможливо помітити шов.

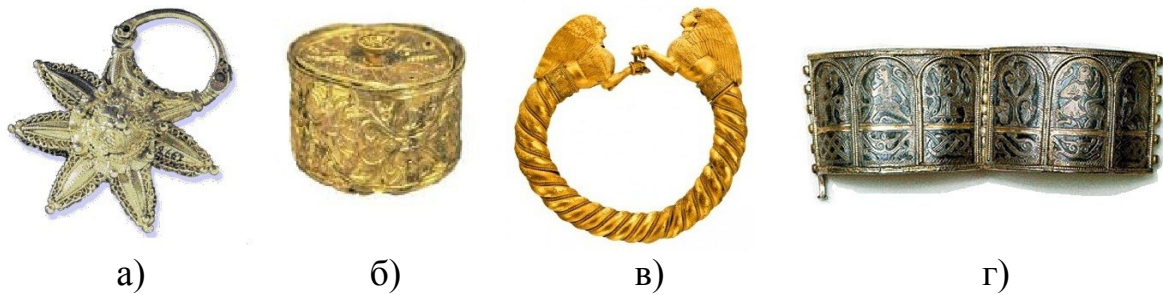


Рисунок 2.2 – Прикраси, виготовлені із застосуванням паяння:  
 а) – колти, б) – піксида, в) – накладки, г) – браслет (4...2 століття до н.е.)

Ковалі аланських племен, які володіли технологією ковальського зварювання сталі і заліза, в X ст. використовували для паяння деталей з бронзи, срібла і золота легкоплавкі свинцево-олов'янисті припої.

Значного успіху мистецтво металообробки досягло в Київській Русі в IX...XII ст. Рівень виробництва та обробки був досить високим, щоб виготовляти чудові ювелірні прикраси (див. рис. 2.2), озброєння і численні знаряддя праці. Ці вироби відрізнялися високою якістю і чистотою зварних швів в місцях з'єднань. Для виготовлення мечів, наконечників списів застосовували сталь і залізо різних сортів. Часто з міцної сталі робили тільки різальну крайку і наварювали на неї ковальським способом більш м'яку сталь. Ковалі таврували свої вироби, наварюючи букви і знаки.

Розвиток продуктивних сил, підйом економіки на Русі, визвольна боротьба народу проти монголо-татарського ярма підняли на новий щабель ковальсько-зварювальну справу. У 1382 році проти орди хана Тохтамиша використовували ковано-зварні гармати, при виготовленні яких залізну крицю розковували в лист, а потім його скручували на залізній оправці в трубу.

Взаємно перекриті кромки листа зварювали внапуск поздовжнім швом. Потім на цю трубу накручували ще один або два листи, стежачи за тим, щоб зварні шви не збігалися. Виходила частина ствола. Кілька таких багат шарових частин-заготовок з'єднували між собою. При цьому спряжувані кінці заготовок попередньо викувували у вигляді внутрішнього або зовнішнього конуса, що дозволяло їх потім з'єднати внапуск ковальським зварюванням (рис. 2.3).

Для того, щоб виготовити великий виріб (вал, довгу смугу), була потрібна велика заготовка. Такі заготовки отримували з пакета дрібних листів. Пакет, скріплений обручем, нагрівали в печі й проковували-

зварювали, надаючи форму бруса. При необхідності кілька таких брусів, в свою чергу, зварювали між собою.

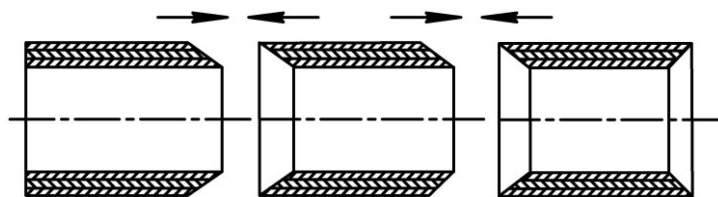


Рисунок 2.3 – Схема елементів ствола гармати, одержуваного ковальським зварюванням

У XIX столітті спостерігався підйом промислового виробництва. Ковальське зварювання досягло епогею розвитку внаслідок використання парових молотів гідравлічних пресів та нових технологій нагрівання. Але таке зварювання не забезпечувало якості зварних швів, було нестабільним та малопродуктивним.

Зварювання плавленням, широко поширене в наш час, не могло бути реалізоване через відсутність потужного джерела тепла, здатного локально розплавити метал для утворення спільної зварювальної ванни.

## 2.2 Винайдення зварювання та його розвиток

На початку 1802 року професор Петербурзької медико-хімічної академії В. В. Петров побудував найбільше для того часу джерело струму – батарею з 4200 пар мідних і цинкових пластин. Саме цій батареї і було призначено стати історичною: на ній була вперше в світі отримана електрична дуга.

Її назвали вольтовою, за назвою джерела струму – вольтовий стовп. Але сучасники не зуміли гідно оцінити відкриття вченого. Від відкриття В. В. Петрова до технічного застосування дугового розряду з метою з'єднання (зварювання) і роз'єднання (різання) металів пройшло близько 80 років. Відкриття В. В. Петрова значно випередило свій час. Треба було з'явитися на світ новому вітчизняному умільцю-самородку Миколі Миколайовичу Бенардосу, який на основі дуги Петрова і досягнень світової електротехніки створив принципово новий спосіб зварювання й різання металів – електродуговий.

М. М. Бенардос народився 7 серпня 1842 року в селі Бенардосівка на

Херсонщині (нині село Мостове Миколаївської області). З ранніх років він виявив цікавість до різних ремесел, особливо до техніки. І хоча за наполяганням батька, полковника у відставці, йому довелося вступити на медичний факультет Київського університету, до кінця він там не довчився і перейшов у Московську землеробську і лісову академію (нині Тимірязєвська сільськогосподарська академія). У 1869 р. М. М. Бенардос оселився в містечку Лух Подольської губернії. Він побудував у маєтку матері механічні майстерні і зайнявся винахідництвом.

Більше 120 оригінальних винаходів зробив М. М. Бенардос, а його винаходи використовуються донині: залізні борони та заглибники, скороварки і молотильні машини, парові ножиці і пневматична поливалка, пароплавні колеса з поворотними лопатями і мисливські човни, замки та крани, турбіни для гідроелектростанцій і гармата для метання канатів на пароплав, що тоне, літальні апарати і верстати для обробки металу і дерева, пневматичні вагонні гальма і вітряний двигун. Велику кількість винаходів зробив він у сфері електротехніки. І найважливіший з них, що приніс йому світову славу, – розроблений у 1882 р. спосіб електродугового зварювання, названий "Електрогефест". Метал розплавлявся дугою, що горить між вугільним електродом, закріпленим у спеціальному тримачі (рис. 2.4), і виробом, підключеними до полюсів джерела струму.

При цьому між генератором і дугою підключалася батарея акумуляторів. Генератор працював безперервно, заряджаючи акумулятори, а в момент збудження дуги між електродом і металом енергія подавалася в дугу у великій кількості. Однак таке джерело живлення було, звичайно, далеким від досконалості.

В результаті напруженої праці до літа 1885 р. М. М. Бенардосу вдалося повністю, в деталях розробити технологію зварювання сталі і чавуну та апаратуру для зварювання, успішно провести випробування. У 1885 році 6 липня він звернувся до Департаменту торгівлі і мануфактур Росії з проханням про видачу йому привілеї на "Спосіб міцного скріплення металевих частин і їх роз'єднання безпосереднім впливом електричного струму".

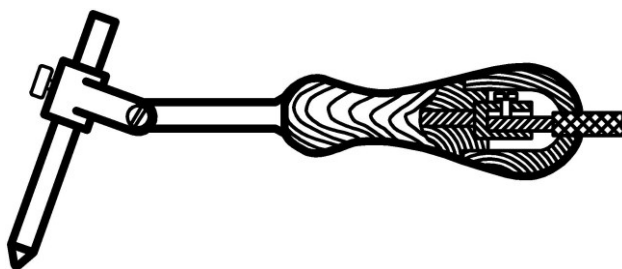


Рисунок 2.4 – Тримач М. М. Бенардоса для ручного дугового зварювання

На цей процес М. М. Бенардосу були видані патенти у Франції, Бельгії, Великобританії, Германії, Швеції, пізніше в Італії, США, Австро-Угорщині, Данії та інших країнах. У 1886 році в столиці Росії було організовано перше в світі спеціалізоване Науково-виробниче об'єднання з електрозварювання – "Електрогефест". Почалось практичне застосування дугового зварювання в майстернях залізниці і на інших підприємствах не тільки для ремонту, але і для виготовлення готових металевих виробів.

"Електрогефест" успішно застосовували і за кордоном. До середини 90-х років XIX століття новий технологічний процес був впроваджений більш ніж на 100 заводах Західної Європи і США, електрозварювання почали застосовувати не тільки для допоміжних ремонтних робіт, але і як основний технологічний процес виробництва нових металевих виробів.

Творцем нового напрямку у виробництві металевих конструкцій став російський інженер М. Г. Славянов, який запропонував використовувати для електрозварювання електричну дугу між виробом і сталевим стрижнем-електродом. Микола Гаврилович Славянов народився 5 травня 1854 року у Воронежській губернії. Закінчивши з золотою медаллю гімназію у Воронежі, він у 1872 році вступив до Петербурзького гірничого інституту, де отримав спеціальність інженера-металурга. Працював на казенних заводах на різних посадах, тривалий час – директором Пермських гарматних заводів.

Славянов вніс до винаходу Бенардоса суттєві вдосконалення, замінив неплавкий вугільний електрод металевим плавким стрижнем, подібним за хімічним складом до зварюваного виробу, що дозволило значно покращити якість зварного шва. Крім того, для захисту зварювальної ванни був використаний металургійний флюс, що розплавлявся. Це значно підвищило якість наплавленого металу. Славянов спроектував спеціальний зварювальний генератор на 1000 А, який замінив акумуляторну батарею у процесі Бенардоса.

Особливо ефективно новий спосіб використовувався для усунення зварюванням дефектів лиття, ремонту деталей паровозів, парових машин, зубчастих коліс тощо. Тільки за три з половиною роки на Мотовилихінському заводі було виконано більше 1600 робіт зі зварювання та наплавлення відповідальних виробів.

Спосіб Славянова отримав диплом першого ступеня і золоту медаль на Всесвітній виставці в Чикаго в 1893 році за дивовижний експонат – металевий дванадцятигранний стакан заввишки 210 мм. Микола



Гаврилович наварив на сталь один за одним електроди з бронзи, томпаку (сплав міді з цинком), нікелю, сталі, чавуну, нейзильберу (сплав міді з цинком і нікелем). Зроблений з цієї багатошарової заготовки стакан масою 5330 грамів представляв відразу всю гаму конструкційних металів того часу.

М. Г. Славянов виготовив і випробував перший в світі зварювальний напівавтомат, елементи якого використані і в сучасних автоматичних зварювальних головках. У 1891 році М. Г. Славянов запатентував винахід у Франції, Німеччині, Великобританії, Австро-Угорщині, Бельгії, а в 1897 році – в США.

Крім позитивних якостей нового виду зварювання його широкому впровадженню заважали недоліки: вигоряння легувальних елементів з сплавів, окиснення шва тощо. Кроком вперед для удосконалення процесу була ідея шведського інженера О. Кельберга. Він запропонував покривати металеві плавкі електроди термостійкими неелектропровідними матеріалами. І хоча тугоплавке покриття потрібно було Кельбергу, щоб виконати зварювання в стельовому положенні (запобігти стіканню електродного металу), виявилось, що воно дещо захищає розплавлений метал від кисню та азоту повітря.

У 1917 році американські вчені О. Андрус і Д. Стреса винайшли новий електрод. Їх сталевий стрижень був обгорнутий смугою паперу, приклеєною силікатом натрію – рідким склом. Папір став джерелом диму, що відтісняв повітря із зони зварювання. Виявилася ще одна цікава властивість нової обмазки – дуга збуджувалася відразу, з першого торкання і не гасла, як звичайно, при незначному подовженні. Позначилася присутність в обмазці натрію.

Спільними зусиллями винахідників багатьох країн до кінця 20-х років минулого століття електроди з обмазкою вже містили спеціальні газотворні речовини, які відтісняють повітря із зони зварювання; легувальні речовини, які покращують склад і структуру металу шва; шлакоформувальні компоненти, які захищають розплавлений метал від взаємодії з повітрям; і, нарешті, речовини з низьким потенціалом іонізації, які стабілізують дугу. Зміною складу компонентів покриття можна було отримувати електроди зі спеціальними властивостями.

Перші великі зварювальні роботи в Росії поновилися і були виконані під керівництвом В. П. Вологдіна. На Дальзаводі (судноремонтний завод) він організував в 1920 році зварювальну ділянку, на якій ремонтували

деталі й вузли суден, виготовляли парові котли, буксирні катери. На станції Великий Невер за проектом Вологдіна вперше був побудований зварний резервуар для зберігання нафтопродуктів, почали будувати зварні судна (першим було судно "Сєдов"), великі доки, морські траулери тощо.

У 1923 році на принципі намагнічувальної паралельної і розмагнічувальної послідовної обмоток збудження В. П. Нікітіним, К. К. Хреновим і А. А. Алексєєвим були розроблені генератори СМ-1, СМ-2, СМ-3.

У 1924 році В. П. Нікітін розробив зварювальний трансформатор СТН. Для невеликих зварювальних струмів Нікітіним був сконструйований трансформатор з внутрішнім реактивним опором (рис. 2.5), що являв собою комбінацію трансформатора і реактивної котушки.

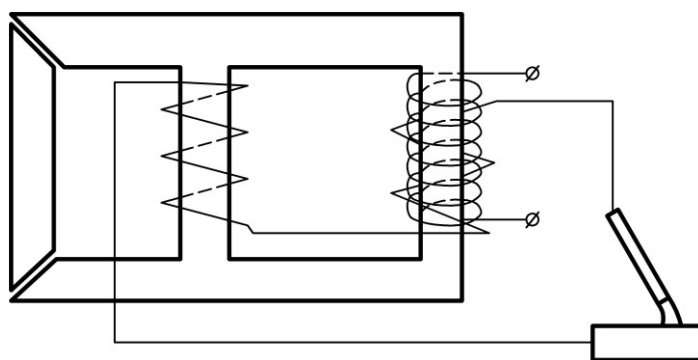


Рисунок 2.5 – Зварювальний трансформатор Нікітіна

До кінця 30-х років були сформульовані три принципи регулювання струму у зварювальних трансформаторах: з декількома виводами, з магнітним шунтом і з регульованим повітряним зазором; кожна зі схем має кілька різних статичних вольт-амперних характеристик. Випуск цього обладнання було освоєно серійно на заводі "Електрик" (м. Санкт-Петербург). У 1928 році заводом ім. Г. І. Петровського стали серійно випускатися покриті електроди для ручного дугового зварювання.

З початком промислового розвитку країни роль електрозварювання проявилася у повному обсязі. У ці роки вчений, фахівець в області мостобудування академік Євген Оскарович Патон зумів оцінити все, що може дати зварювання. Він організував у Києві при Академії наук УРСР лабораторію, що поставила перед собою мету широкого застосування електрозварювання замість клепання в різних галузях промисловості. У січні 1934 року на базі цієї електрозварювальної лабораторії був створений Інститут електрозварювання, який в даний час носить ім'я його

організатора – Є. О. Патона. У тридцяті роки минулого століття ручне дугове зварювання покритими електродами впроваджувалося у виробництві металоконструкцій. Котли і кораблі, каркаси будівель і деталі мостів, автомобілі та вагони тощо – діапазон зварних конструкцій поповнювався і, здавалося, ніщо вже не перерве наступ зварювання. Але в 1938-1939 роках у Західній Європі несподівано зруйнувалося кілька мостів. Балки мостів були зварними. У цей період тисячі залізничних вагонів в Росії та інших країнах були зняті з експлуатації через тріщини в зварних рамах і візках.

Почалися всебічні дослідження з впливу процесу зварювання на властивості металу шва і навколошовної зони, які дозволили знайти способи керувати якістю зварного з'єднання. У період з 1934 по 1941 рік під керівництвом Є. О. Патона і за його безпосередньої участі був виконаний цикл досліджень у галузі проблем міцності зварних конструкцій, їх розрахунку та надійності. У результаті систематичних робіт з вивчення металургійних і електротехнічних процесів дугового зварювання був розроблений спосіб зварювання під флюсом. Подальші роботи зі зварювання, виконані в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона, принесли інституту всесвітню популярність.

### 2.3. Розробка процесу контактного електрозварювання

Незалежно від винахідників на Заході М. М. Бенардос запропонував технологію точкового контактного електрозварювання – другого з найпоширеніших в даний час способів зварювання металів. Сутність цього способу полягала в тому, що до двох сталевих пластин, розміщених одна на одній, підводився струм за допомогою спеціальних кліщів (рис. 2.6), в які були вставлені вугільні електроди. Струм проходив через електроди, між якими затискалися пластини, і виділеної теплоти було достатньо для утворення зварної точки.

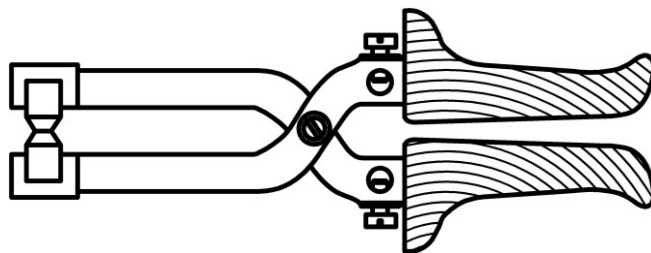


Рисунок 2.6 – Кліщі Бенардоса для контактеного зварювання

Слава винахідника стикового контактного зварювання закріпилася за видатним американським винахідником Ельхамом Томсоном, який в 1870 році, коли йому було тільки 17 років, почав викладати хімію і механіку в Центральній вищій школі у Філадельфії, а через кілька років уже читав лекції у Франклінському інституті. Однією з проблем в кінці XIX століття було з'єднання телеграфних проводів.

Ця проблема була вирішена за допомогою стикового контактного зварювання. До 1884 року Е. Томсоном були створені необхідні для контактного стикового зварювання елементи обладнання: комутувальна апаратура, динамо-машина для генерування змінного струму, що подається на трансформатор великої питомої потужності, спеціальні струмопідвідні затискачі. У 1885 році він відпрацьовує техніку зварювання, доводить до безвідмовної роботи зварювальну апаратуру і на початку 1886 року подає заявку на патент, що захищає принципово новий спосіб електричного зварювання.

Спосіб Томсона описується так: "зварювані предмети приводяться в дотик місцями, які повинні бути зварені, і через них пропускається струм величезної сили – до 200000 ампер при низькій напрузі – 1...2 вольти. Місце дотикання чинить струму найбільший опір і тому сильно нагрівається. Якщо в цей момент почати стискати зварювані частини і проковувати місце зварювання, то після охолодження предмети виявляться добре звареними" (Патент США № 347140 від 10 серпня 1886 р.).

Проковування було не просто даниною моді, що було залишком колишньої технології, а прийомом, що забезпечував підвищення якості металу шва. Оскільки крім нагрівання застосовувалося і механічне здавлювання, спочатку спосіб називали "електричним куванням" або "безвогненним методом зварювання". Перший пристрій, що виконував нагрівання і стискання двох проводів, складався з двох важелів, на одному кінці з'єднаних шарніром з ізоляційного матеріалу, а з іншого кінця зв'язаних пружиною через ізоляційні втулки. У цих важелях посередині стискаються деталі, що зварюються, – дроти, стрижні і т. п.

У наступній установці був використаний трансформатор із замкнутим контуром (рис. 2.7). На його первинну обмотку подавалася напруга 600 В, і по ній протікав струм силою 20 А. Ця обмотка намотувалася на котушку діаметром 305 мм. Котушку охоплював і виток вторинної обмотки, кінці якої під'єднувалися через затискачі до зварюваних деталей. Зварювальним ланцюгом протікав струм 12000 А при напрузі 1 В. Е. Томсон

сконструював установку, в якій струм переривався синхронно з прикладанням зусилля стискання. Для стискання з великими зусиллями винахідник використав гідравлічний привод.

Наступним кроком у розвитку стикового контактного зварювання було застосування імпульсів струму і тиску. В процесі розширення сфери застосування стикового зварювання вдосконалювалася його технологія й розроблялися нові схеми нагрівання. Були запропоновані кілька способів комбінованого (дугового і контактного) зварювання.

А. Коффін застосував зварювання стрижнів великого перерізу з попереднім нагріванням короткою дугою, що вібриє. Ним же була розроблена технологія зварювання з проміжною вугільною пластиною-електродом, що під'єднується до вторинної обмотки і вставляється на час розігрівання між деталями, що стикаються.

В інших пристроях між деталями, що зварюються, поміщали металеву пластину, а струм підводився до кінців деталей через вугільні контакти.

Пластину вибирали з матеріалу з більшим коефіцієнтом електроопору, ніж у зварюваного металу, завдяки чому прискорювалося нагрівання. Перед стисканням вставку видаляли. Коффін запропонував також пропускати магнітне поле через зварювану ділянку, вважаючи, що це викличе структурні зміни, які приведуть до зменшення провідності ділянки, що зварюється, а, отже, до прискорення нагрівання. Установки для контактної стикового зварювання часто називали "електричними горнами".

У 1892 році Е. Райс використав принцип контактної зварювання в "ковальському горні для ювелірів". Він запропонував поміщати пластини, до яких потрібно було приварити орнамент з дроту, на металеву плиту,

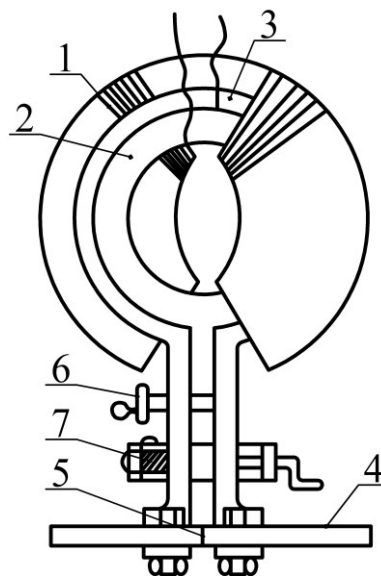


Рисунок 2.7 – Схема установки для контактної зварювання:  
1 – первинна обмотка; 2 – сердечник; 3 – виток вторинної обмотки; 4 – зварювані деталі; 5 – стик; 6 – гвинт; 7 – пружина

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Акулов А. И. Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – М. : Машиностроение, 1977. – 432 с.
2. Корниенко А. Н. У истоков "Электрогефеста" / А. Н. Корниенко. – М. : Машиностроение, 1987. – 168 с.
3. Николаев Г. А. Специальные методы сварки / Г. А. Николаев, Н. А. Ольшанский. – М. : Машиностроение, 1975. – 231 с.
4. Патон Б. Е. Огонь сшивает металл / Б. Е. Патон, А. Н. Корниенко. – М. : Педагогика, 1988. – 144 с.
5. Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х т. / [Редкол. Г. А. Николаев (пред.) и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. Т. 2. / Под ред. А. И. Акулова. – 1978. – 462 с.
6. Специальные методы сварки и пайка / В. А. Саликов, М. Н. Шушпанов, В. В. Пешков, А. Б. Коломенский. – Воронеж : ВГТУ, 2000. – 214 с.
7. Теория сварочных процессов / [Под ред. В. В. Фролова]. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
8. Технология и оборудование сварки плавлением / [Под ред. Г. Д. Никифорова]. – М. : Машиностроение, 1986. – 320 с.
9. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / [Под ред. Б. Е. Патона]. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
10. Фетисов Г. П. Сварка и пайка в авиационной промышленности / Г. П. Фетисов – М. : Машиностроение, 1983. – 216 с.
11. Фролов В. В. Молодёжи о сварке / В. В. Фролов, В. А. Парахин – М. : Машиностроение, 1979. – 111 с.
12. Шебеко Л. П. Оборудование и технология дуговой автоматической сварки / Л. П. Шебеко – М. : Высшая школа, 1986. – 279 с.
13. Андреев В. В. Инверторные источники питания сварочной дуги / В. В. Андреев // Сварщик. – 1999. – № 6. – С. 25–29.
14. Блащук В. Е. Металл и сварка в монументальной скульптуре / В. Е. Блащук // Автоматическая сварка. – 2002. – № 5. – С. 46–52.
15. Корниенко А. Н. Сварочная техника в годы второй мировой войны / А. Н. Корниенко // Автоматическая сварка. – 1997. – № 7. – С. 42–51.
16. Корниенко А. Н. Первые изобретения в области контактной



сварки / А. Н. Корниенко // Автоматическая сварка. – 1996. – № 5. – С. 45–52.

17. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 1999. – № 1. – С. 4–14.

18. Зорин Е. Е. Сварка. Вступление в специальность / Е. Е. Зорин, Н. Г. Худолей – М. : ТОВ «Недра-бизнесцентр», 2004. – 232 с.

*Навчальне видання*

**Савуляк Валерій Іванович  
Заболотний Сергій Антонович**

## **ЗВАРЮВАННЯ ВСТУП ДО ФАХУ**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено В. Савуляком

Підписано до друку 26.02.2015 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 8,6.  
Наклад 300 (1-й запуск 1-100) пр. Зам. № 2015-018.

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.