

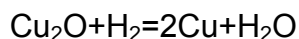
# 1. ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ТА ЇЇ СПЛАВІВ

## 1.1. Склад, структура, властивості і застосування мідних сплавів

Мідь кристалізується в гранецентровану кубічну гратку, поліморфних форм не має. Температура плавлення 1083°C; питома теплота плавлення 48,7 кал/г; температура кипіння 2596°C. Питома густина 8,94г/см<sup>3</sup>. Чиста мідь має невелику міцність і високу пластичність ( $\sigma_s=216\text{...}235\text{МПа}$ ,  $\delta=60\%$ ; для заліза  $\sigma_s=250\text{МПа}$ ,  $\delta=30\%$ ; для сталі Ст3  $\sigma_s=400\text{МПа}$ ,  $\delta=25\%$ ). З пониженням температури міцність міді зростає, а пластичність знаходиться на високому рівні аж до температури рідкого водню ( $t=-260^\circ\text{C}$ ). З підвищенням температури міцність міді зменшується, а відносне подовження практично не змінюється до температури  $t=200^\circ\text{C}$ . В інтервалі температур  $t=200\text{...}600^\circ\text{C}$  пластичні характеристики міді різко падають, а при нагріві вище  $600^\circ\text{C}$  пластичність металу відновлюється. При  $20^\circ\text{C}$  питомий електричний опір міді  $\rho=1,7\text{мкОм/см}$ , що в півтора рази менше ніж алюмінію та майже в шість раз менше ніж у заліза. Всі домішки, а також наклеп суттєво підвищують питомий електричний опір. М'яка відпалена мідь являє собою пластичний метал, в той час як мідь нагартowana, після холодної пластичної обробки (волочіння), значно знижує свої пластичні властивості.

Хімічна активність в звичайних атмосферних умовах невелика (дуже повільно окислюється). При високих температурах мідь досить інтенсивно взаємодіє з киснем, сіркою, фосфором і галогенами. До вуглецю мідь пасивна, не реагує вона також з азотом. Мідь має хорошу корозійну стійкість в прісній і морській воді, розбавленій сірчаній і соляній кислотах та в деяких інших агресивних середовищах. Мідь використовується в хімічному та енергетичному машинобудуванні зважаючи на високу електро і теплопровідності, високу корозійну стійкість в деяких агресивних середовищах. Всі ці властивості тим вище, чим вище чистота металу, що висуває особливі вимоги до зварювання виробів з чистої міді.

Промисловість випускає технічну мідь, яка має ряд домішок: вісмут, сурьму, миш'як, залізо, нікель, свинець, олово, кисень, цинк та інші. Всі ці домішки та легуючі елементи зменшують теплопровідність та електричну провідність, змінюють температуру плавлення, густину, механічні характеристики та інші властивості міді. Найбільш шкідливою домішкою, яка знижує технологічні, механічні та корозійні властивості міді, являється кисень. Його концентрацію зводять до мінімуму шляхом розкислення міді. Кисень знаходиться по границям зерен в вигляді евтектики  $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ , що має температуру плавлення  $1067^\circ\text{C}$  і не впливає на червоноламкість, але при підвищеній температурі в атмосфері водню можлива реакція відновлення міді з утворенням води.



Пари води, викликаючи високий тиск всередині мікропустот і нещільностей, можуть викликати розриви та тріщини (воднева хвороба міді).

Технічна мідь випускається по ГОСТ 859-2001: М00б, М0б, М1б, М00, М0, М1, М2 і т.д. Технічна мідь звичайної чистоти має 0,1-0,5% домішок (М1 – домішок - 0,1%; М2, домішок – 0,3%; М3, домішок – 0,5%). Найбільш шкідливими домішками міді крім кисню є вісмут і свинець. Вони майже нерозчинні в міді і утворюють легкоплавкі евтектики, які кристалізуються відповідно при  $270^\circ\text{C}$  та  $327^\circ\text{C}$  і тим самим викликають при нагріві червоноламкість міді (ефект спостерігається при вмісті  $\text{Bi}>0,001\%$  і  $\text{Pb}>0,01\%$ ). Мідні сплави, зберігаючи позитивні властивості міді (високі тепло- та електропровідність, корозійну стійкість), мають в порівнянні з міддю підвищену міцність при гарних технологічних властивостях. Для легування міді використовують

в основному розчинні в ній елементи: алюміній, цинк, олово, берилій, кремній, марганець, нікель. Всі сплави міді можна поділити на латуні та бронзи.

Латунями називаються мідно-цинкові сплави, що містять до 45% цинку (ГОСТ 15527-2004). Сплави із вмістом цинку до 20% називаються томпаком. Латунь і томпак містять цинк у межах  $\alpha$ -твердого розчину (до 39% цинку). У межах  $\alpha$ -твердого розчину властивості латуней монотонно змінюються: збільшується міцність міді і знижуючи її пластичність. Латуні мають гарну корозійну стійкість, втрачаючи її тільки в аміачному середовищі, так як аміак, сприяючи утворенню комплексних сполук з міддю і з цинком, руйнує захисні шари (аміачне розтріскування). При більшому вмісті цинку утворюється інтерметаліди ( $\text{CuZn}$  і  $\text{CuZn}_2$  -  $\beta$ -фаза), яка різко змінює механічні властивості мідних сплавів. Спеціальні латуні, крім цинку можуть містити залізо, алюміній, кремній, нікель та інші компоненти. Позначаються: Л68 (латунь,  $\text{Cu}=68\%$ ,  $\text{Zn}=32\%$ ; ЛАЖ60-1-1 (латунь,  $\text{Cu}=60\%$ ,  $\text{Al}=0,75\text{...}1,5\%$ ,  $\text{Fe}=0,75\text{...}1,5\%$ ).

Бронзи являють собою сплави міді з вмістом цинку не більше 4 ... 5%. Головними легуючими компонентами бронз є алюміній, марганець, кремній, берилій, олово, хром (ГОСТ 18175-78, ГОСТ 495-92) Бронзи можуть мати і складний склад при легуванні відразу декількома компонентами. Бронзи, що містять цинк і свинець, мають високі антифрикційні властивості і використовуються для підшипників ковзання. Бронзи, що містять алюміній, мають високі механічні властивості і високу корозійну стійкість, леговані марганцем - гарну корозійну стійкість і жароміцність, кремнієм - високу корозійну стійкість та високу зносостійкість, хромом - високі механічні властивості ( $\sigma_s = 200 \dots 280\text{МПа}$ ), при цьому зберігають цінні фізичні властивості (електро і теплопровідність на рівні чистої міді), берилієм мають механічні властивостями сталі (виготовляють пружини і гнучкі елементи), високу корозійну стійкість, немагнітні. Позначення: Бр.ОФ4-0,25 – бронза олов'яно-фосфорна ( $\text{Sn}=3,5\text{...}4\%$ ,  $\text{P}=0,2\text{...}0,3\%$ ); Бр.АЖМц10-3-1,5 – бронза ( $\text{Al}=9\text{...}11\%$ ,  $\text{Fe}=2\text{...}4\%$ ,  $\text{Mn}=1,2\%$ ).

Такі властивості міді та її сплавів, як електро- та теплопровідність, висока корозійна стійкість, здатність піддаватись пластичній деформації в холодному та гарячому станах, можливість створення на основі міді гама сплавів з широким діапазоном експлуатаційних характеристик, сприяють використанню їх в різних галузях техніки:

- електротехнічна промисловість (мідь);
- хімічне машинобудування: (теплообмінники (латунь), холодильники, вакуумні апарати (бронза) і т.п.);
- спеціальна електromеталургія (кристалізатори для плавки металів (мідь);
- криогенна техніка (мідь);
- виготовлення вкладишів підшипників ковзання (олов'яні бронзи);
- суднобудування (латунь, бронза).

## 1.2. Здатність до зварювання мідних сплавів

### 1.Пори

Мідь в розплавленому стані поглинає значну кількість кисню та водню. Під час охолодження та кристалізації металу шва, яка відбувається з великою швидкістю через високу теплопровідність міді, різко зменшується розчинність водню в металі. Знижена стійкість металу шва проти виникнення пор, обумовлена виділенням також водяної пари ( $\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{H} \rightarrow 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$ ) (воднева хвороба міді) і, можливо, водню з металу шва, що кристалізується. Спорідненість міді до азоту вельми мала. У зв'язку з цим азот не є збудником пористості і навіть може бути використаний в якості захисної атмосфери при зварюванні міді. При зварюванні латуней причиною пористості може стати випаровування цинку, температура кипіння якого нижче температури

плавлення міді і становить 907°C. Випаровування цинку зменшує введення марганцю або кремнію.

## 2. Гарячі тріщини

Легка окислюваність міді в розплавленому стані сприяє утворенню закису міді, який розчинний у рідкому і дуже обмежено в твердому металі. Він дає з міддю легкоплавку складову ( евтектику ), яка, зосереджуючись по границям кристалітів, знижує стійкість металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин. У міді, призначеної для виготовлення зварних конструкцій, вміст кисню не повинен перевищувати 0,03%, а для відповідальних виробів - 0,01%. Небезпечними домішками міді відносно зниження стійкості проти утворення кристалізаційних тріщин в зварних швах є також вісмут і свинець. Тому вміст вісмуту в міді допускається не більше 0,003%, а свинцю - не більше 0,03%, сурьми - не більше 0,005%, сірки – 0,004%. Позитивно впливають розкислювачі (фосфор, марганець, кремній,  $Cu_2O+Mn=2Cu+MnO$ ).

Зварним швам на основі міді притаманна крупнозерниста стовбчаста структура, яка обумовлена великою теплопровідністю металу. Інтенсивне тепловідведення від осі шва в основний метал створює гарні умови для направленої кристалізації – витягування великих за розмірами кристалітів в напрямку теплового потоку. Крупнокристалічна будова швів посилює їх схильність до утворення кристалізаційних тріщин. Позитивно на здрібнення структури впливає залізо.

## 3. Холодні тріщини

При зварюванні міді та її сплавів холодні тріщини не виникають, тому що мідь не має поліморфних перетворень.

## 4. Окрихчення зварних з'єднань

Мідь та її сплави мають високу стійкість до крихкого руйнування при низьких температурах, так як з пониженням температури пластичність міді знаходиться на високому рівні (до  $t = -196^\circ C$ ).

## 5. Забезпечення рівномірності зварного з'єднання з основним металом

Рівномірність забезпечується вибором відповідних зварювальних матеріалів. При зварюванні легованих сплавів вибирають дріт з трохи підвищеним вмістом легуючих елементів з врахуванням втрат на угар.

### 1.3. Способи зварювання мідних сплавів

Спосіб зварювання	Рекомендація	Зварювальні матеріали
Е	+	Типи покриття: основне (Б). з розкислювачами. Марки електродів: «Комсомолец-100», АНЦ/ОЗМ-2, АНЦ/ОЗМ-3, АНЦ/ОЗМ-4, ОЗБ-2М, МН-4, ЦБ-1, ММЗ-2, АНЦ-1.
УП	(+)	Захисний газ азот високої чистоти. Дріт: відповідно до основного металу зі збільшеним вмістом легуючих елементів та з розкислювачами. (Бр.КМцЗ-1).
ІП	+	Захисний газ: аргон ГОСТ 10157-79. суміші (70...80%) аргону +(20..30%) азоту. Дріт аналогічний способу зварювання УП
Ф	+	Використовують активні і пасивні флюси:

		Марки флюсів: плавлені АН-348, ОСЦ-45, АН-26С, АН-20С, ФЦ-10, (для латуні МАТИ-53, АНФ-5), керамічні ЖМ-1, К-13. для великих товщин АМ-М13. Марки дротів: М1, М16, Бр.КМц3-1, Бр.ОЦ4-3, ЛК80-3.
Ш	(+)	Марки флюсів: АНМ-10. Дріт аналогічний складу основного металу.
Г	+	Ацетилено-кисневе полум'я: для міді $O_2/C_2H_2 = 1,05/1,10$ , а для латуней - 1,3/1,4 (с метою зменшення випаровування цинку.). Присадковий дріт з розкисниками, флюси: бура, борна кислота.
ІН	++	Захисний газ: аргон, гелій, суміші (75% аргону + 25% гелію) Для зварювання використовують вольфрамовий електрод з лантаном або ітрієм (ЭВИ-1, ЭВИ-2, ЭВЛ) Присадний дріт: аналогічний УП (Бр.КМц3-1, МНЖКТ5-1-0,2-0,2, Бр.Х0,5, Бр.ОЦ4-3, Бр.ОФ6,5-0,4), а також мідь М0, М1.
П	+	Плазмоутворюючий газ – аргон, захисний $CO_2$ , Аг або суміш. Електрод вольфрамовий.
ЕП	(+)	Зварювання в вакуумі, як правило без присадка.
Л	(+)	Захисне середовище – вакуум або Аг, Не.

#### 1.4. Рекомендації по режимам і техніці зварювання міді та сплавів

Висока теплопровідність міді (у 6 разів вище, ніж у заліза ) вимагає застосування концентрованих джерел нагріву і в багатьох випадках попереднього і супутнього підігріву основного металу при зварюванні. Перед початком зварювання, а також у процесі його метал товщиною більше 5 мм піддають попередньому підігріву: мідь - 250...300°C, латунь - 300 - 350°C і бронзу – 500...600°C. Крім усунення дефектів (підрізів, напливів, пор) попередній та супутній нагрів основного металу покращує умови кристалізації зварного шву, сприяє зневодненню металу шва, знижує внутрішні напруження та усуває схильність металу шва до утворення тріщин.

Зварювальний дріт перед вживанням піддають очищенню травленням, для цього застосовують водний розчин азотної кислоти ( $75 \text{ см}^3/\text{л}$ ) або суміш сірчаної та соляної кислоти у співвідношенні 100:1 з наступним промиванням у воді, потім у лузі, після чого знову в чистій проточній воді. Після промивання дріт сушать гарячим повітрям. Мідні електроди перед зварюванням прожарюють, що знижує ймовірність появлення водневої хвороби. У відношенні стійкості проти виникнення пор рекомендовані односторонні стикові шви з наскрізним проплавленням крайок. Зварювання кутових швів таврового і напусткового з'єднання викликає значні утруднення через пористість металу шва.

Високий коефіцієнт лінійного розширення міді і її сплавів ( для міді коефіцієнт лінійного розширення в 1,5 рази більше, ніж у сталі) вимагає прийняття додаткових заходів проти деформації конструкцій.

Підвищена рідкотекучість металу ускладнює зварювання міді у вертикальному і особливо в стельовому положенні. Зустрічаються труднощі також при зварюванні кільцевих швів. Для однопровідних стикових швів потрібне застосування підкладок,

які щільно прилягають до зварюваного металу: мідних, графітових, азбестових, флюсових подушок.

### *Ручне дугове зварювання*

Мідь товщиною до 5-6мм зварюють без розроблення крайок, до 10 мм - з односторонньою розробкою при куті скосу крайок до 60-70° і притупленні 1,5-3 мм.

При більшій товщині рекомендується Х-подібна розробка крайок. Струм -  $40-60 \cdot d_e$

Можливе зварювання вугільним електродом, яке застосовують обмежено, переважно для виробів, що не мають значних навантажень. Процес зварювання ведеться довгою дугою, щоб уникнути шкідливого впливу на зварювальну ванну окису вуглецю, що виділяється. В якості присадки при зварюванні міді використовується дріт, що містить такі раскислювачі, як фосфор, марганець, кремній. При цьому зварювання виконують без додаткових заходів захисту. Для зварювання латуні використовують дріт, такий як і для зварювання міді, а для зварювання бронзи присадний матеріал такого ж хімічного складу, як і зварюваний матеріал.

### *Газове зварювання*

Для зварювання міді та бронзи використовують нормальне полум'я пальника. Газове зварювання переважно виконується ацетилено - кисневим полум'ям. Замінники ацетилену доцільно використовувати при зварюванні міді та її сплавів малих товщин. Для металу малих товщин (до 3 - 4 мм ) потужність полум'я вибирається з розрахунку 150 - 175л/год ацетилену на 1 мм товщини, а при товщині 8 - 10мм потужність полум'я збільшується до 175 - 225л/год на 1 мм товщини. Розкислення металу зварювальної ванни відбувається за рахунок флюсів, або введенням раскислювачів в присадковий дріт. Флюси складаються зі з'єднань бору (борна кислота, борний ангідрид, бура), які розчиняють закис міді і виводять його в шлак. Основні труднощі при газовому зварюванні латуней полягають в випаровуванні із сплавів цинку, яке починається вже при  $t = 906^{\circ}\text{C}$ . Для зменшення випаровування цинку зварювання ведуть сильно окислювальним полум'ям з  $\beta_o = 1,3 \dots 1,4$ . У цьому випадку на поверхні ванни розплавленого металу утворюється плівка окислів, яка сприяє зменшенню випаровування цинку.

### *Автоматичне зварювання під флюсом*

Основною перевагою автоматичного зварювання Си під флюсом є можливість отримання стабільних високих механічних властивостей без попереднього підігріву. Використовують при виготовленні великогабаритних зварних конструкцій з міді великих товщин. Технологічний процес досить простий і майже не відрізняється від процесу зварювання сталей. Зварюють товщини 5...60 мм. Зварювання, зазвичай, виконують за один прохід з повним проплавленням стикових крайок. Метал товщиною до 20...25мм зварюють одним електродом діаметром 4...5 мм без розроблення крайок. При більшій товщині металу рекомендується V- подібне розроблення крайок (притуплення 5...8 мм). В зв'язку з відсутністю попереднього підігріву початок шва розміщують на вивідній планці. При товщині більшій 15мм застосовують зварювання спареним (розщепленим) електродом (товщина 15...30мм) без розробки крайок з розміщенням електродів поперек шва (відстань 20 мм). Під флюсом успішно зварюють латуні, тому що дуга закрита і випаровування цинку мінімальне. Без розробки крайок зварюють латунь товщиною до 20 мм (двохстороннім швом). За один прохід – 12мм. При товщині більше 14мм застосовується V- та Х- подібне розроблення крайок. При зварюванні латуні бажана низька напруга дуги (зменшується випаровування цинку). Добре зварюються автоматом під флюсом бронзи (алюмінієві, хромисті). При зварюванні міді під

кислими флюсами в метал шва переходять Si і Mn, в результаті погіршуються тепло та електрофізичні властивості металу шва в порівнянні з основним металом. Застосування безкисневих фторидних флюсів, наприклад марки АН-М1, який містить (за масою ) 55%  $MgF_2$ , 40%  $NaF$ , 5%  $BaF_2$  дозволяє отримувати шви, питомий опір яких в 1,5 рази нижче, а теплопровідність в 2 рази вище в порівнянні зі швами, виконаними під кислим флюсом АН-348А.

### *Зварювання в захисних газах*

Зварювальний струм при зварюванні вольфрамовим електродом вибирають в залежності від діаметра електроду і захисного газу. Струм постійний прямої полярності. При зварюванні в азоті або суміші азоту та гелію силу струму зменшують на 10...15% порівняно з аргоном, а напругу підвищують на 15...20%. Гелій та азот забезпечують більш високий ККД процесу зварювання, в порівнянні з аргоном. При зварюванні в азоті глибина проплавлення більше, ніж при зварюванні в суміші азоту та гелію, але стійкість дугового розряду в азоті нижче ніж в суміші азоту та гелію. В азоті вище пороутворення. Зварювання неплавким вольфрамовим електродом успішно застосовується для зварювання латуней, бронз, мідно-нікелевих сплавів та ін. При зварюванні неплавким електродом відбувається більш інтенсивне випаровування цинку, олова та інших елементів.

Зварювання плавким електродом застосовується рідше, ніж неплавким (хоча продуктивність в 2-3 рази вище), так як використовуючи плавкий електрод, важко забезпечити стабільність процесу та одержати безпористі шви. При зварюванні плавким електродом краплі металу проходять через дуговий проміжок, перегріваються і піддаються більш сильному окисленню за рахунок повітряної атмосфери, яка попадає в струмінь захисного газу. Зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів ведуть постійним струмом зворотної полярності від джерел живлення дуги з жорсткою зовнішньою характеристикою. Використовують звичайні автомати і напівавтомати для зварювання в захисних газах зварювальним дротом діаметром 1...2 мм. Режими:  $U_d = 22-26$  В, діаметр електроду  $d_e = 1$  мм, струм  $I_{зв.} = 150...220$  А, діаметр електроду  $d_e = 2$  мм, струм  $I_{зв.} = 300...450$  А

Плавким електродом можна зварювати без підігріву більш товщини, ніж неплавким:

- В аргоні – товщина  $S \geq 6...8$  мм для плавкого,  $S \leq 6...8$  мм. для вольфрамового.
- В гелії, азоті – товщина  $S \geq 10...12$  мм і  $S \leq 10...12$  мм для вольфрамового.

Зварювання плавким електродом застосовується для міді товщиною не менше 6...8 мм. Рекомендуються V- та X- подібні розробки крайок з кутом розкриття  $\alpha = 60...70^\circ$  без притуплення. При використанні плавкого електроду невеликого діаметру (0,8...1,4 мм) досить добре зварюються латуні та мідно-нікелеві сплави. Попередній підігрів необхідний лише при товщині  $S \geq 12$  мм.

### *Плазмове зварювання*

При плазмовому зварюванні міді використовують зварювальні плазмотрони прямої дії і спеціальні джерела живлення.

Електрошлакове зварювання успішно застосовується для міді великих товщин. Для зварювання міді найбільш прийнятний електрод великого перерізу. Пластинчастий ( для коротких швів ) пластинчасто- дротяний - плавкий мундштук (для швів великої протяжності). Для ЕШЗ міді застосовують легкоплавкі флюси на фторидній основі (АНМ-10), які забезпечують стійкий процес, підігрів і плавлення крайок на необхідну глибину, хороше формування швів і легке видалення шлакової кірки з їх поверхні. При зварюванні виробів з міді застосовують спеціальні формуючі пристрої з графіту. При зварюванні мідних заготовок 140x160 мм величину зазору приймають рівною 56

- 60мм, товщину пластинчастого електроду - 18 мм,  $I_{зв} = 8000 \dots 10000$  А;  $U = 40 - 50$ В;  $V_{зв} = 12 - 15$  м/год.

#### **1.4. Термічна обробка зварних з'єднань з мідних сплавів**

Термічна обробка, як правило, не проводиться. Іноді для поліпшення якості зварні шви проковують. Проковку здійснюють при підігріві до 500°C (при більш високих температурах мідь сильно знижує свою міцність і може дати тріщини), в результаті чого суттєво здрібнюється структура металу. Механічні властивості зварних з'єднань з міді і її сплавів поліпшуються термічною обробкою (особливо після проковки) - нагріванням до 500 ... 600°C і охолодженням у воді.

#### **Контрольні питання**

1. Назвіть основні сплави міді та їх відмінність.
2. Назвіть основні дефекти зварності мідних сплавів та причини їх виникнення.
3. Які основні властивості мідних сплавів ускладнюють процес зварювання і чому?
4. Які рекомендації щодо режимів зварювання даної групи сплавів?
5. Яку термічну обробку використовують для зварних з'єднань мідних сплавів?
6. Які основні проблеми при зварюванні латуней?